



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY**

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**VOLUMETRICKÁ PŘESNOST OBRÁBĚCÍCH  
STROJŮ**

VOLUMETRIC ACCURACY OF MACHINE TOOLS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Daniel Máčala**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.**

**BRNO 2019**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky  
Student: **Bc. Daniel Máčala**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Kvalita, spolehlivost a bezpečnost  
Vedoucí práce: **Ing., Dipl.-Ing. Michal Holub, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Volumetrická přesnost obráběcích strojů

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zajistit stále rostoucí požadavky na výrobní přesnost obráběcích strojů je možné formou nasazení nových technologií a postupů. Mezi takovéto technologie patří tzv. volumetrické kompenzace. Zde záleží na mnoha faktorech, zda se podaří aplikovat volumetrické kompenzace správně a zda je dosaženo dostatečného zlepšení. Právě návrh vhodného postupu zavádění korekcí do stroje je jednou z možných cest dalšího zvyšování volumetrické přesnosti.

### Cíle diplomové práce:

Popis současného stavu v oblasti zavádění volumetrické kompenzace na řídicím systému Siemens.  
Popis současného stavu používané měřicí techniky.  
Systémový rozbor problematiky, návrh a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení zadaného úkolu.  
Pro navržený postup naplánovat experiment.  
Statistické zpracování a vyhodnocení výsledku experimentu.  
Vlastní závěry popisující vhodnost nasazení navrženého postupu.

### Seznam doporučené literatury:

Marek, J. a kol., MM Průmyslové spektrum: Konstrukce CNC obráběcích strojů IV. 2018. Speciální vydání. Dostupný z WWW: . ISBN 978-80-906310-8-3.

Weck, M., Brecher, Ch. Werkzeugmaschinen : Konstruktion und Berechnung. 2006. überarb. Auflage. Verlag Berlin Heidelberg : Springer, 2006. 701 s. ISBN 3-540-22502-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá vlivem volumetrické přesnosti obráběcího stroje na velikosti posuzovaného pracovního prostoru. Posouzení vlivu bylo provedeno na základě zkoušek tříosého vertikálního CNC obráběcího centra. Diplomová práce je rozdělena na dvě části, a to teoretickou a praktickou. Teoretická část je orientována na geometrickou / volumetrickou přesnost obráběcích strojů, měřicí techniku pro měření geometrických chyb a plánování experimentu. V praktické části je rozvedeno plánování experimentu dle Shainina, popis postupu práce s měřicími přístroji a samotné měření geometrické / volumetrické přesnosti stroje včetně statistického vyhodnocení. Výstupem diplomové práce je popsání vlivu velikosti volumetrické odchylky na velikosti měřeného pracovního prostoru pomocí statistických metod.

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with the influence of the volumetric accuracy of the machine tool on the size of the assessed work space. The impact assessment was carried out on the basis of tests of a three-axis vertical CNC machining center. The thesis is divided into two parts, theoretical and practical. The theoretical part is focused on geometric / volumetric accuracy of machine tools, measuring technique for measuring geometric errors and Design of Experiment. In the practical part, there is an analysis of the Design of Experiment according to Shainin, description of the work with the measuring instruments and the measurement of the geometric / volumetric accuracy of the machine including statistical evaluation. The output of the thesis is the description of the influence of volumetric deviation on the size of the measured work space by means of statistical methods.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Volumetrická přesnost, Obráběcí stroje, LaserTRACER, Ballbar, Plánování experimentu

## **KEYWORDS**

Volumetric accuracy. Machine tools, LaserTRACER, Ballbar, Design of Experiment



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

MÁČALA, D. *Volumetrická přesnost obráběcích strojů*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2019, 117 s. Vedoucí diplomové práce Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing., Dipl.-Ing Michalu Holubovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Děkuji také panu Ing. Josefu Bednáři, Ph.D. za rady a věnovaný čas při statistickém zpracování dat. Nakonec bych chtěl poděkovat své rodině za podporu a možnost studovat.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing., Dipl.-Ing Michala Holuba, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24.5.2019

.....  
Máčala Daniel



# OBSAH

1	ÚVOD .....	15
2	MOTIVACE.....	17
3	VOLUMETRICKÁ KOMPENZACE.....	19
3.1	Přesnosti obráběcích strojů .....	19
3.1.1	Geometrická přesnost .....	20
3.1.2	Přesnost polohování.....	21
3.1.3	Pracovní přesnost.....	21
3.1.4	Přesnost kruhové interpolace .....	21
3.1.5	Volumetrická přesnost .....	22
3.1.6	Teplotní dilatace .....	22
3.2	Současné metody měření geometrického stavu .....	22
3.2.1	Interferometry .....	23
3.2.2	Laser Tracker .....	25
3.2.3	LaserTRACER.....	28
3.2.4	Ballbar .....	30
3.2.5	Digitální libely .....	31
3.2.6	ANALYZER systém.....	32
3.3	Zavádění volumetrické kompenzace na řídicím systému Siemens .....	33
4	PLÁNOVANÝ EXPERIMENT .....	35
4.1	Historie.....	35
4.2	Použití plánovaného experimentu.....	36
4.3	Základní principy .....	36
4.3.1	Replikace .....	36
4.3.2	Blokování.....	37
4.3.3	Znáhodnění .....	37
4.4	Základní kroky pro plánování experimentu .....	37
4.5	Klasické plánování experimentu.....	39
4.5.1	Jednofaktorový plán .....	39
4.5.2	Plně faktorový plán.....	39
4.5.3	Částečně faktorový plán .....	39
4.5.4	Faktorový plán se sloupci vzájemného působení .....	39
4.6	Moderní plánování experimentu .....	40
4.6.1	Plánování experimentu podle Shainina. ....	40
4.6.2	Plánování experimentu podle Taguchiho .....	42
5	DEMONSTRÁTOR .....	45
6	EXPERIMENT.....	47
6.1	Plán experimentu .....	47
6.2	Postup měření .....	51
6.3	Postup práce s MCV 754 QUICK.....	52
6.4	Postup práce s LaserTRACEREM.....	53
6.5	Postup práce s Ballbarem QC20-W .....	55
6.6	Výsledky experimentu .....	57
6.6.1	Měření č. 1 .....	57
6.6.2	Měření č. 2 .....	60
6.6.3	Měření č. 3 .....	60

6.6.4	Měření č. 4.....	60
6.6.5	Měření č. 5.....	60
6.6.6	Měření č. 6.....	61
6.6.7	Měření č. 7.....	61
6.6.8	Měření č. 8.....	61
6.6.9	Měření č. 9.....	61
6.6.10	Měření č. 10.....	62
6.6.11	Měření č. 11.....	62
6.6.12	Měření č. 12.....	62
6.6.13	Shrnutí měření .....	62
7	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ DAT.....	65
7.1	Vyhodnocení plánovaného experimentu .....	65
7.2	Regresní analýza pro faktor prostoru .....	69
7.3	Shrnutí statistického vyhodnocení.....	70
8	DISKUSE.....	71
9	ZÁVĚR .....	73
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	75
11	SEZNAM ZKRATEK, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	77
11.1	Seznam zkratk.....	77
11.2	Seznam tabulek.....	77
11.3	Seznam obrázků.....	78
12	SEZNAM PŘÍLOH.....	83

# 1 ÚVOD

Dlouhodobým trendem v průmyslovém odvětví je kontinuální zvyšování kvality výroby. Jednou z možností zvyšování kvality výroby je zvyšování nároků. Nároky se kladou především na geometrickou přesnost u obráběcích center a u souřadnicových měřicích strojů. Vyhovující geometrická přesnost je jednou ze základních podmínek nasazení obráběcího centra do výroby. Přesnost stroje a následně jeho kontrola představuje komplexní problematiku, kterou se musí zabývat výrobce moderních strojů. Proto v průmyslu dochází k vývoji nových technologií, které zlepšují přesnost a kvalitu těchto obráběcích center a jejich komponentů.

Aby byla výroba přesná, je potřeba stroj dobře navrhnout, přesně vyrobit součástky a precizní montáž stroje. Ačkoli se výrobci podaří všechny tři zmíněné kroky dokonale splnit, nikdy tento stroj nebude vyrábět součástky dokonale přesné.

K určení nepřesnosti obráběcích center se používá celá řada technologií, které využívají specifické softwary, díky nimž se dá velká část chyb kompenzovat neboli odstranit. Jednou z efektivních možností, jak zvýšit přesnost obráběcího centra, jsou tedy softwarové kompenzace. Na trhu jsou různé typy kompenzací, které se dají rozlišit na běžné, používané při jakémkoliv obrábění a nadstandartní, které je třeba si zakoupit od výrobce dané softwarové opce. Mezi pokročilé kompenzace patří tzv. volumetrická kompenzace. Aplikování této kompenzace do stroje je závislé na mnoha faktorech. Hlavně správný návrh postupu zavádění korekce do obráběcích center je další možnost pro zvyšování volumetrické přesnosti.

Na dnešním trhu je považován přístroj LaserTRACER jako nejmodernější a nejpřesnější měřicí systém pro měření geometrických a volumetrických chyb stroje. Tento přístroj byl vyvinut německou firmou Etalon AG ve spolupráci se spolkovým úřadem PTB (Physikalisch-Technische-Bundesanstalt) a národní fyzikální laboratoří NPL (National Physical Laboratory). Doposud není vytvořena žádná norma, která by popisovala správné měření tímto přístrojem. Kalibrační postup, který nabízí výrobce, je v souladu s normami ISO 230-2/4/6. [1]

Při využívání moderních kompenzací a měřicích cyklů je možné využívat obráběcí centra na hraně jejich možností s velkou přesností práce.

Hlavním podnětem k tvorbě této práce je zjistit, jestli existuje závislost mezi velikostí kompenzovaného prostoru a výslednou přesností malého obráběcího stroje. Zjištění z této práce může být použito při praktickém měření, které by zrychlilo proces měření. Pod pojmem malé obráběcí stroje se rozumí obráběcí stroj s maximálním pojezdem nejdelší osy do 1 m a maximální hmotností obrobku do 1 t. [2]





## 2 MOTIVACE

Ke zpracování této diplomové práce, respektive k tématu, mě vedl zájem získat nové informace z oblasti průmyslové výroby. V dnešní době se nacházejí obráběcí stroje skoro v každé strojírenské firmě a z toho důvodu je toto téma důležité. Jelikož rostou požadavky zákazníků na vyšší kvalitu dodávaných produktů, což úzce souvisí i s přesností obráběcího procesu.

Tato oblast má velký potenciál dalšího rozvoje, což mi bylo velkou motivací. V České republice se však volumetrické kompenzace moc nevyužívají. Jen málo firem využívá tuto možnost, jako například Fermat s.r.o. a TAJMAC-ZPS. Ve světě se tato technologie začíná čím dál více využívat hlavně v oblastech výroby, kde je kladen velký důraz na kvalitní výrobu, jako například u společnosti Boeing, která patří mezi největší světové výrobce letecké techniky na světě.

Na základě analýzy zadání a po seznámení s aktuální situací byly v souladu s pokyny vedoucího pro tuto diplomovou práci stanoveny následující cíle:

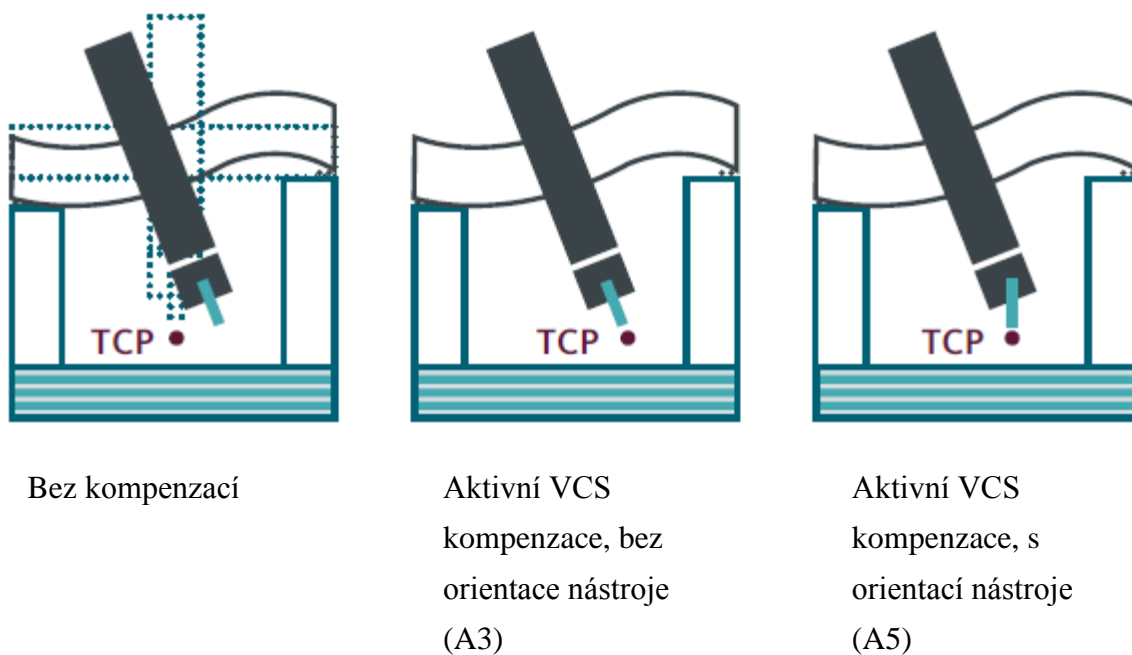
1. Popis současného stavu v oblasti zavádění volumetrické kompenzace na řídicím systému Siemens.
2. Popis současného stavu používané měřicí techniky.
3. Systémový rozbor problematiky, návrh a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení zadaného úkolu.
4. Pro navržený postup naplánovat experiment.
5. Statistické zpracování a vyhodnocení výsledku experimentu.
6. Vlastní závěry popisující vhodnost nasazení navrženého postupu.



### 3 VOLUMETRICKÁ KOMPENZACE

Volumetrická kompenzace je kompenzační metoda určena pro osy obráběcího stroje. Je založena na principu odstranění geometrických chyb polohování. Tyto chyby mohou být sice malé, ale když se nasčítají, vytvoří nepřesnosti, které mohou v případě velmi malých tolerancí ohrozit rozměrovou přesnost vyráběných součástí. V dnešní době, už většinou moderní obráběcí stroje nabízejí volumetrické kompenzace lineárních os. Kompenzace zahrnuje lineární a úhlové chyby, chyby přímosti, chyby ve směru roll podél osy a chyby pravoúhlosti mezi osami. [3]

Na obrázku 1, lze vidět princip volumetrické kompenzace, které nabízí řídicí systém Siemens SINUMERIK. Tento výrobce označuje kompenzaci pod zkratkou VCS (Volumetric Compensation System). Lze rozlišovat mezi opcemi A3, A5 a A5plus. Vlevo na obrázku lze vidět polohu TCP (Toll Center Point) u stroje bez volumetrické kompenzace. Uprostřed je aktivována kompenzace VCS A3 pro stroje s třemi lineárními osami. Je zřetelné, že TCP souhlasí s požadovanou polohou, ale orientace nástroje setrvává ovlivněna chybou geometrie nástroje. Vpravo lze vidět aktivovanou kompenzací VCS A5 pro pěti a víceosé stroje, kde je patrná i kompenzace orientace nástroje. [2] [4]



Obr. 1 Princip volumetrické kompenzace [4]

#### 3.1 Přesnosti obráběcích strojů

Obráběcí stroje prezentují z hlediska techniky komplexní zařízení, na které jsou kladeny velké požadavky. Z tohoto důvodu musí být pro zachování vysokých nároků zařazeny úkony ve formě zkoušek pro potvrzení, zda obrobek splňuje předepsané geometrické a zároveň rozměrové tolerance. [2]

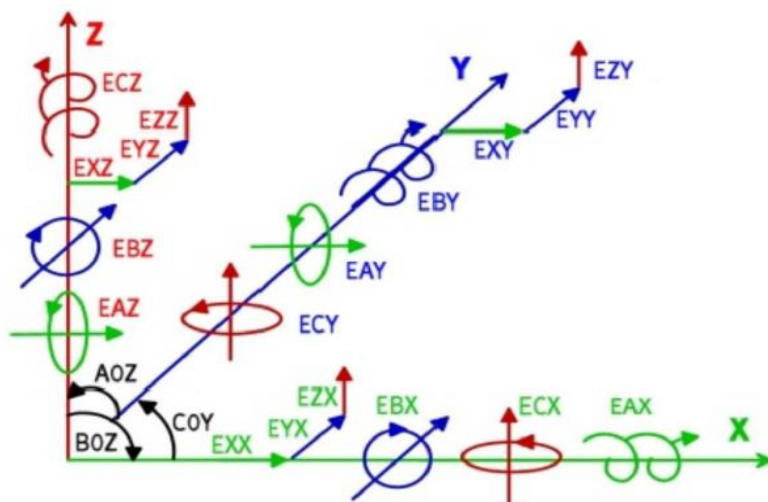
Přesnost obráběcích strojů se rozděluje na: [2]

- Geometrickou přesnost
- Přesnost polohování
- Pracovní přesnost
- Přesnost kruhové interpolace
- Volumetrické přesnost
- Teplotní dilatace

### 3.1.1 Geometrická přesnost

Geometrická přesnost souvisí s kvalitou výroby stroje a jeho montáží v nezátíženém stavu. Popisuje také geometrickou strukturu obráběcího stroje, ze které je možné posoudit vlastnosti funkčních dílů ovlivňující jeho pracovní přesnost. Pro měření a vyhodnocení geometrické přesnosti os se využívá norma ČSN ISO 230-1. Tato norma popisuje pouze zkoušky přesnosti a nezabývá se funkčními zkouškami stroje, ani zjišťováním charakteristických parametrů, jelikož tyto zkoušky by měly být provedeny před zkouškami přesnosti. Součástí geometrické zkoušky je ověření rozměru, tvaru a polohy součástky. [2] [5]

Na obrázku 2 lze vidět všech 21 geometrických chyb typické pro tříosý obráběcí stroj. Popis těchto chyb je uveden v tabulce 1. [1]



Obr. 2 Schéma odchylek tříosé kinematiky [1]

Tab 1) Geometrické chyby [2]

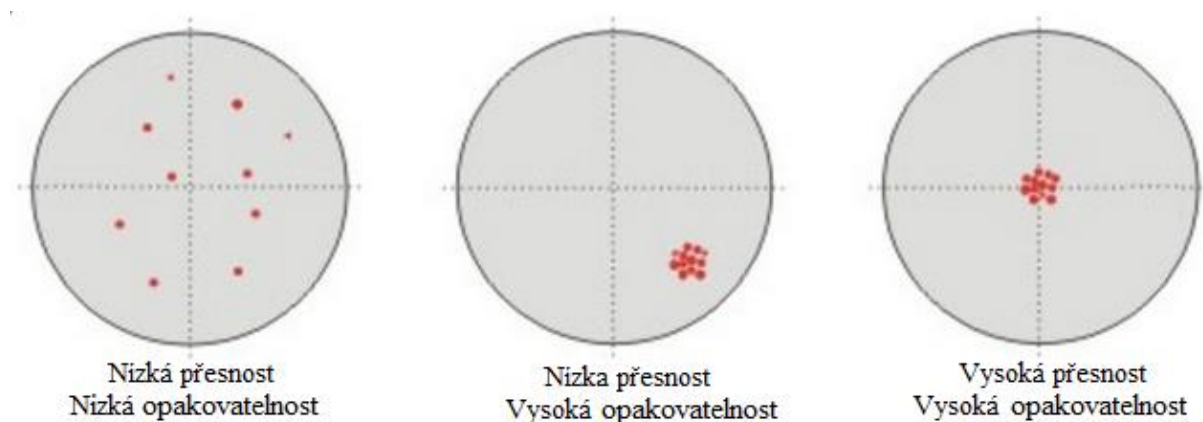
EXX	chyba přesnosti najetí do polohy v ose X	Chyby translační	EAX	úhlová chyba naklopení ve směru osy X	Chyby úhlové
EYY	chyba přesnosti najetí do polohy v ose Y		EBX	úhlová chyba klopení ve směru osy X	
EZZ	chyba přesnosti najetí do polohy v ose Z		ECX	úhlová chyba natočení ve směru osy X	
EYX	chyba přímosti Y ve směru osy X		EAY	úhlová chyba klopení ve směru osy Y	
EZX	chyba přímosti Z ve směru osy X		EBY	úhlová chyba naklopení ve směru osy Y	
EXY	chyba přímosti X ve směru osy Y		ECY	úhlová chyba natočení ve směru osy Y	
EZY	chyba přímosti Z ve směru osy Y		EAZ	úhlová chyba klopení ve směru osy Z	
EXZ	chyba přímosti X ve směru osy Z		EBZ	úhlová chyba natočení ve směru osy Z	
EYZ	chyba přímosti Y ve směru osy Z		ECZ	úhlová chyba naklopení ve směru osy Z	

Pokračování Tab 1) [2]

A0Z	chyba kolmosti v rovině Y-Z	Chyby kolmosti
B0Z	chyba kolmosti v rovině Z-X	
C0Y	chyba kolmosti v rovině X-Y	

### 3.1.2 Přesnost polohování

Přesnost polohování je definována jako vzdálenost mezi očekávanou polohou a skutečnou polohou mechanického systému. Vztahuje se na lineární a rotační osy. Je ovlivněna zejména pohonným mechanismem a typem uložení. Úzce souvisí s opakovatelností najetí, která je definována jako rozdíl dosažení zadané polohy při pokusech, které se provádí za stejných podmínek. Provádí se standardně v nezatíženém stavu. Na obrázku 3 lze vidět, že na kvalitní obrobek nestačí jenom vysoká přesnost nebo opakovatelnost, ale součinnost těchto dvou parametrů. [6]



Obr. 3 Přesnost polohování a opakovatelnosti [6]

### 3.1.3 Pracovní přesnost

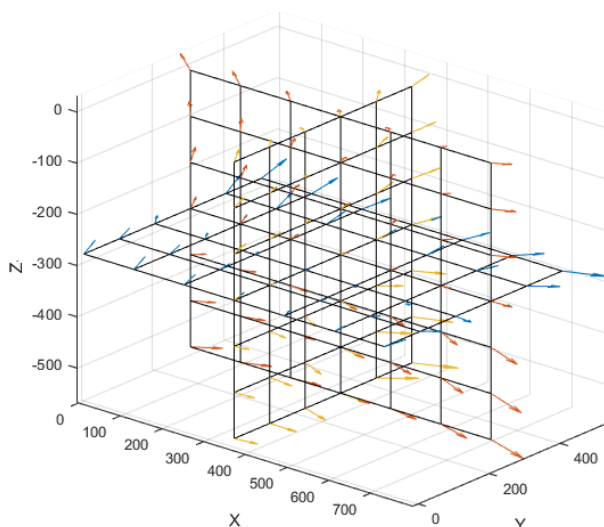
Pracovní přesnost je atribut obráběcího stroje, který popisuje, s jakou jakostí a produktivitou může stroj obrobek vyrobit. Přesnost se posuzuje na zkušební obrobku, na kterém se měří rozdíl mezi skutečnými rozměry na obrobku a rozměry požadovanými. Popisuje tedy přesnost výrobního procesu. Je ovlivněna zejména geometrickou přesností, odolností stroje vůči pružným deformacím, volbou řezných podmínek apod. [2]

### 3.1.4 Přesnost kruhové interpolace

Pojem přesnost kruhové interpolace vyjadřuje rozdíl mezi naprogramovanou dráhou a přesně změřenou skutečnou kruhovou dráhou. Kdybychom měli dokonale přesný stoj, potom by kruhová dráha přesně souhlasila s naprogramovanou dráhou. V praxi to není možné, jelikož kterákoliv chyba stroje způsobí odchylku poloměru kruhu od naprogramovaného programu. Pro vyhodnocení a měření přesnosti kruhové interpolace se zabývá norma ČSN ISO 230-4. K měření se nejčastěji používá Ballbar, který rychle a snadně vyhodnotí stav obráběcího stroje. [2]

### 3.1.5 Volumetrická přesnost

Volumetrická přesnost obráběcího stroje je představována vektorovou mapou chybových odchylek v pracovním prostoru, kterou lze vidět na obrázku 4. Tato přesnost je v normě ČSN ISO 230-1 definována pro tříosé centrum. Definuje se jako maximální rozsah relativních chyb mezi ideální a skutečnou polohou ve směru všech tří os a maximální rozsah orientace odchylek pro směry a pohyby ve všech třech osách v definovaném objemu. Pro odhadnutí volumetrických vlastností stroje se využívá norma ČSN ISO 230-6, která stanovuje zkoušky diagonálního přestavení. Měření těchto vlastností je časově náročný a složitý proces. [2]



Obr. 4 Grafické znázornění volumetrické přesnosti [1]

Pro měření volumetrických vlastností obráběcího stroje byl vyvinut speciální stroj LaserTRACER. Jedná se o samonaváděcí interferometrické zařízení, které se využívá pro měření délky. Další možnost je využít tzv. trackerů, které využívají laserový sledovací systém. [2]

### 3.1.6 Teplotní dilatace

U každých procesů, kde se využívá energie, vzniká teplo. Změnou teploty dochází k deformaci strojního zařízení, které vede k nesprávnému polohování stoje a kvůli toho se může vyrobít zmetkový obrobek. Například ocelová tyč o délce 1 m se po zahřátí o 5 °C prodlouží o 0,05 mm. Zdroje tepla, které nepříznivě působí na obráběcí stroj, můžeme rozdělit do dvou skupin, a to na vnější (okolní prostředí) a vnitřní (pohony lineárních os, vytváření třísky apod.). Norma ČSN ISO 230-3 je zaměřena na zkoušení tepelných deformací. [2]

## 3.2 Současné metody měření geometrického stavu

V dnešní době rostou nároky na přesnost obráběcích strojů a tím pádem i na kvalitu daného obrobku. Proto se vyvinuly přístroje na měření volumetrické odchylky, které patří k nejmodernějším a nejpřesnějším měřicím přístrojům pro obráběcí stroje a centra. Těchto měřicích přístrojů je na trhu hojně množství, které se neustále zlepšují a zdokonalují jak po softwarové, tak po hardwarové stránce.

Přístroje pro měření geometrického stavu se dělí na: [5]

- Interferometry
- Laser Tracker
- LaserTRACER
- Ballbar
- Digitální libely
- ANALYZER systém

### 3.2.1 Interferometry

Interferometry jsou zařízení, které se používají k měření malých rozdílů délek, jelikož mají vysokou rozlišitelnost. Hlavní částí měřicího systému je vlnová délka laserového paprsku. Nejběžnějším je He-Ne laser o vlnové délce 633 nm. Rastr této vlnové délky je 10x jemnější než u typického skleněného měřítka, a proto laserový systém umožňuje snadno dosáhnout vysokého rozlišení. [7]



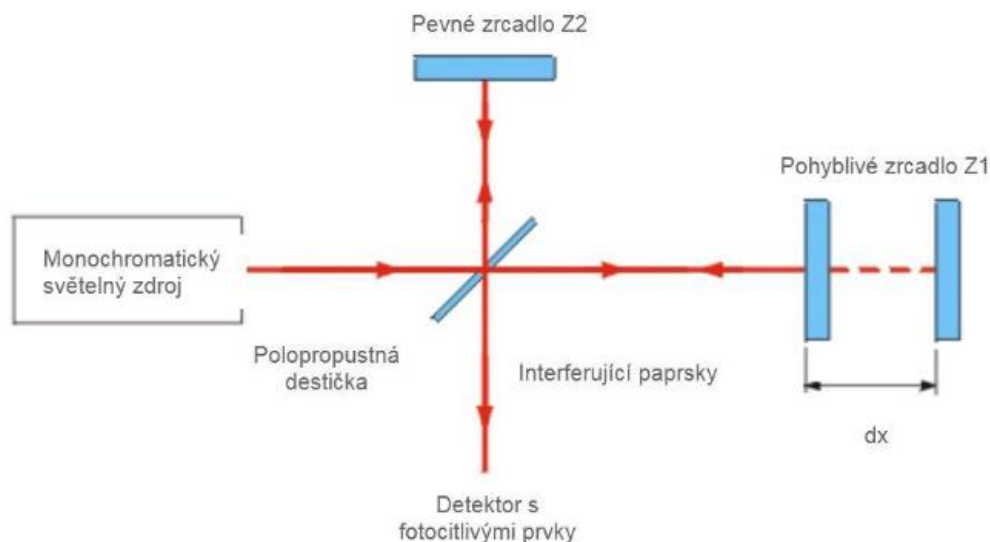
Obr. 5 Interferenční obrazec [8]

Na obr. 5 můžete vidět interferenční obrazec neboli interferogram, který vznikl interferencí světla. Z tohoto obrazce lze vyčíst dráhový rozdíl světelných paprsků. [8]

Základní typy interferometrů: [8]

- Michelsonův interferometr
- Machův-Zehnderův interferometr
- Fabryův-Perotův interferometr

**Michelsonův interferometr:** Nejběžnější interferometrický typ používaný pro přesné měření obráběcích strojů. Vynalezl ho Albert Abraham Michelson v roce 1887. Princip měření je znázorněn na obr. 6. Na vstupu je jeden koherentní paprsek světla, který se štěpí na dva paprsky (referenční a měřicí) pomocí polopropustného zrcadla. Takto vzniklé paprsky se odrážejí od zrcadel zpět do detektoru, kde před dopadem interferují. Paprsky mohou interferovat buď konstruktivně, nebo destruktivně. U konstruktivní interference je referenční a měřicí paprsek ve fázi, tím pádem se jejich amplitudy vzájemně zesilují a vytváří jasné pruhy. Oproti destruktivní interferenci jsou tyto paprsky v proti fázi, tím pádem se jejich amplitudy vyruší a vytváří se tmavé pruhy. Tento fázový rozdíl vytváří vzdálenost, po které paprsek procházel. [3] [9]



Obr. 6 Princip Michelsonova interferometru [9]

## Výrobci

Mezi nejčastěji prodávané laserové interferometry patří laserový interferometr XL-80 se samostatným kompenzátorem podmínek prostředí XC-80 (viz obr. 7) se snímači od firmy Renishaw XL-80. Je to výkonný nástroj nejen pro kalibraci obráběcích strojů, ale taky souřadnicových měřicích strojů a dalších pohybových systému. [3]



Obr. 7 Laserový interferometr XL-80 s kompenzátorem XC-80 [3]

Laser XL-80 zaručuje přesnost lineárního měření  $\pm 0,5 \mu\text{m/m}$  při podmínkách, kde teplota nepřesáhne  $0^\circ\text{C}$ – $40^\circ\text{C}$  a tlaku  $0,065 \text{ MPa}$  –  $0,1150 \text{ MPa}$ . Maximální rychlost lineárního měření je až  $4 \text{ m/s}$  při čtení hodnot s frekvencí  $50 \text{ kHz}$ . V celém rozsahu měření rychlostí je dosažené lineární rozlišení  $1 \text{ nm}$ . Stabilita laseru je kratší než  $6 \text{ minut}$ , což umožňuje uživateli prodloužit dobu měření, kvůli zkrácení doby pro ustálení laseru. [3]

Kompenzátor XC-80 je jeden z hlavních prvků, který zaručuje přesnost měření. Měří velmi přesně teplotu, tlak vzduchu a relativní vlhkost. Na základě naměřených údajů upravuje vlnovou délku laseru, kvůli eliminaci chyb měření, způsobené změnou podmínek prostředí. Tato kompenzace se provádí automaticky každých  $7 \text{ vteřin}$ . [3]

Kromě výrobce Renishaw je na trhu velké množství dalších výrobců. Jsou to například výrobci Keysight s modelem 5519 A/B, Feanor s modelem LP 30, LIMTEK s modelem LS 120, Optydyne s modelem MCV-5000 a mnoho dalších. V tabulce 2 je srovnání vybraných parametrů laserových interferometrů. [3] [10] [11] [12] [13]

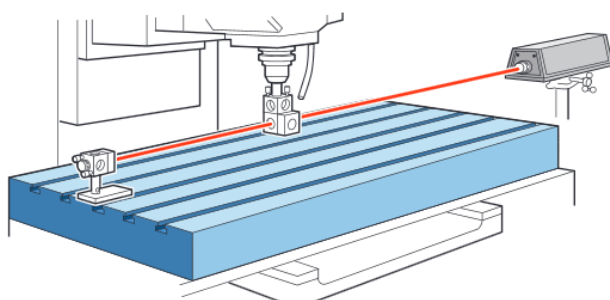
Tab 2) Srovnání laserových interferometrů [3] [10] [11] [12] [13]

Model	5519 A/B	LP 30	XL-80	LS 120	MCV-5000
Výrobce	Keysight	Feanor	Renishaw	LIMTEK	Optydyne
Měřicí rozsah	0-40 m	0-30 m	0-40 m	0-20 m	0-30 m
Rozlišení	1 nm	1 nm	1 nm	1 nm	1 nm
Max. rychlost	1 m/s	0,3 m/s	4 m/s	1 m/s	4 m/s
Přesnost měření	$0,1 \mu\text{m}$	$0,15 \mu\text{m}$	$0,5 \mu\text{m}$	$0,7 \mu\text{m}$	$0,05 \mu\text{m}$
Teplotní rozsah	$0-40^\circ\text{C}$	$0-40^\circ\text{C}$	$0-40^\circ\text{C}$		
Stabilita laseru	$>10 \text{ min}$	20 min	$>6 \text{ min}$		
Tlak	70-110 kPa	94-106 kPa	65-115 kPa		

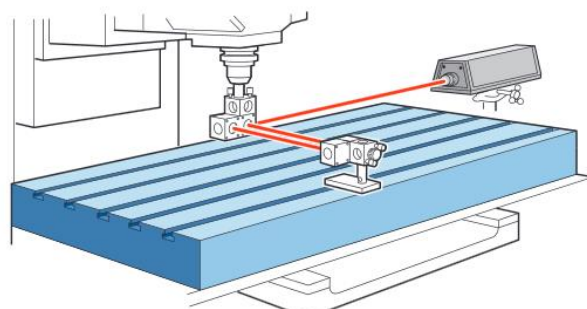


Na obr. 8 a 9 je jeden z mnoha způsobů měření přesnosti obráběcího stroje. V těchto případech se jedná o lineární měření a měření natočení v ose Y. Další způsoby, které laserová interferometrie nabízí jsou: [14]

- Úhlové polohování
- Přímost
- Rovinnost
- Kolmost



Obr. 8 Optické nastavení pro lineární měření [14]



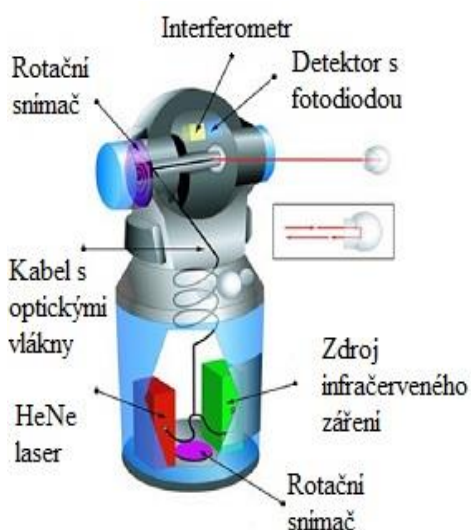
Obr. 9 Optické nastavení pro měření natočení na ose Y [14]

### 3.2.2 Laser Tracker

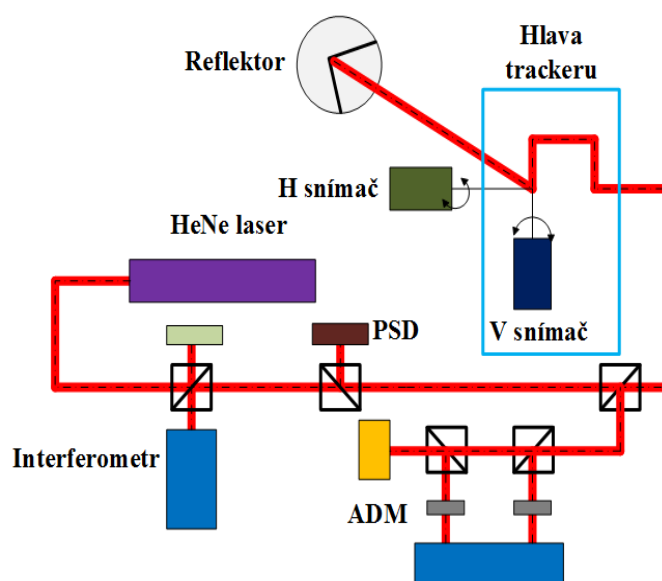
Pod názvem Laser Tracker se pojednává o zařízeních, které jsou schopné sledovat měřený objekt pomocí laserového paprsku. Tyto zařízení sledují reflektor a spolu s detektorem reflektovaného paprsku umožňují stanovit přesnou vzdálenost pomocí počtu konstruktivní a destruktivní interference. Také dokážou stanovit úhlové natočení dvou rotačních os měřící hlavy. [5]

Aplikace Laser Trackerů je v dnešní době současným trendem v měření geometrické přesnosti obráběcích strojů a obrobků. Hlavní výhodou je možnost měřit rozměrné obrobky, které mnohdy nejdou měřit jiným způsobem. Mezi další výhody patří i mobilita trackerů, která umožňuje zkontrolovat obrobek přímo na stoji. Naopak jednou z hlavních nevýhod používání Laser Trackerů je, že měřený bod musí být v přímém dohledu mezi hlavou Laser Trackeru a reflektorem, který se díky své konstrukci nedostane do všech měřených míst. Mezi další nevýhody patří také, že Laser Trackery umožňují sledovat jenom jeden bod během měření. [5] [15]

Princip fungování Laser Trackerů je znázorněn na obr. 10 a 11. Tyto přístroje měří pomocí sférického souřadnicového systému, což znamená, že jakýkoliv daný bod je určen třemi čísly, a to radiální vzdálenosti bodu od trackeru, polární nebo zenitový úhel, který měří výšku a nakonec úhel azimutu, který je měřený na referenční rovině procházející trackerem a je ortogonální vůči zenitu. Čísla pro úhly zenitu a azimutu se určují pomocí dvou úhlových snímačů. Radiální vzdálenost je určena pomocí interferometru, absolutního měřidla vzdálenosti (ADM) nebo kombinací obou. Princip interferometru byl popsán v kapitole 3.2.1. Absolutní měření vzdálenosti používá infračervené světlo laseru, které se odrazí od cílového objektu a znovu vstoupí do trackeru. Toto světlo se pak přemění na elektrický signál, ze kterého se analyzuje čas letu. Výhodou absolutního měření vzdálenosti je, že může automaticky měřit vzdálenost, a to i v případě, že byl paprsek předtím přerušen. Při použití interferometru, musí operátor vrátit cílové zařízení do známé polohy, aby resetoval tracker. [16]



Obr. 10 Konstrukce Laser Trackeru [16]



Obr. 11 Schéma Laser Trackeru [5]

### Výrobci

V dnešní době existuje spousta výrobců Laser Trackerů, ale jenom tři výrobci patří mezi nejvýznamnější. Jedná se o Hexagon Manufacturing Intelligence (HMI), Automated Precision Inc. (API) a FARO®. Firma HMI vyrábí Laser Trackery pod názvem Leica. Nejnovější jsou modely AT402 (obr. 12) a AT403. Firma API vyrábí spoustu typů Laser Trackerů. Nejvýznamnější je Radian s jeho modely Pro (obr. 13), Plus a Core. Poslední uvedená firma FARO vyrábí tyto zařízení pod názvem Vantage. Nejnovější modely jsou S6 (obr. 14) a E6. Srovnání vybraných modelů je prezentováno v tabulce 3. [17] [18] [19]



Obr. 12 HMI Leica AT 402 [19] Obr. 13 API Radian Pro [17] Obr. 14 FARO Vantage S6 [18]

Tab 3) Srovnání Laser Trackerů [17] [18] [19]

Výrobce	HMI	API	FARO
Model	Leica	Radian	Vantage
Značka	AT 402	Pro	S6
Fyzické parametry			
Hmotnost	290x221x188 mm	110x177x355 mm	240x240x416 mm
Rozměry	7,3 kg	12,2 kg	13,4 kg
Rozsah			
Azimut	±360 °	±320 °	±360 °
Elevace	±145 °	-59 ° až +79 °	-55,1 ° až +77,9 °
Vzdálenost	1,5-320 m	0-80 m	0-80 m
Technologie laseru	ADM	ADM/IFM	ADM
Rozlišení	0,1 μm	0,5 μm	0,5 μm
Přesnost	±10 μm	ADM 15 μm - 0,7 μm/m IFM 0,5 μm/m	16 μm+0,8 μm/m
Úhlové snímače			
Rozlišení	0,07 arc sec	±2arc sec	±2arc sec
Přesnost	±15 μm+6 μm/m	10 μm+5 μm/m	20μm+5μm/m
Pracovní prostředí			
Teplota	0 až 40 °C	-10 až 45 °C	-15 až 50 °C
Relativní vlhkost	max 95 %	10 až 95 %	max 95 %
Nadmořská výška	-700 až 5500 m	-700 až 3000 m	-700 až 9000 m

Na obrázku 15, lze vidět vývoj Laser Trackerů od společnosti Automated Precision Inc. Je zde patrný dnešní trend ve vývoji, a to miniaturizace jak rozměrových parametrů, tak hmotnosti. Miniaturizace je zřetelná na současném modelu Radian Pro, který váží jen 12,2 kg, což pomáhá v mobilitě tohoto zařízení. [17]



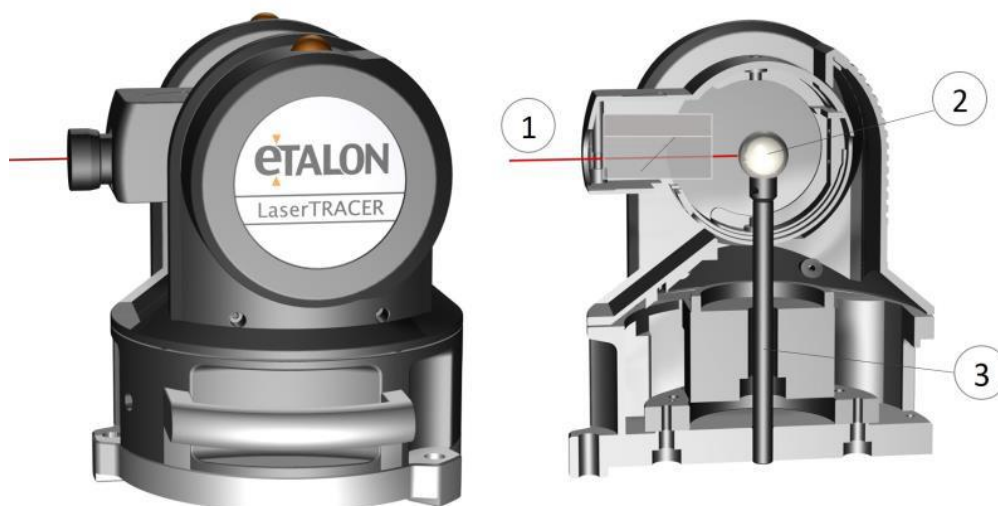
Obr. 15 Průběh vývoje Laser Trackerů od společnosti API [17]

### 3.2.3 LaserTRACER

Pod názvem LaserTRACER je pojednáváno o samonaváděcím laser interferometrickém zařízení, které je založeno na dvou principech. Na interferometrickém laseru a multilateraci / sekvenční multilateraci, díky které se určuje poloha sledovaného bodu. LaserTRACER byl primárně vyvinut pro kalibraci souřadnicových měřicích strojů a vzhledem k technickým parametrům dále rozšířen na kompenzaci obráběcích strojů. Na trhu se vyskytuje jenom jeden výrobce tohoto zařízení - firma Etalon, která je součástí firmy Hexagon Manufacturing Intelligence. Jsou vyráběny pouze dvě varianty tohoto přístroje - LaserTRACER-NG a LaserTRACER-MT. V tabulce 4 je znázorněno srovnání těchto dvou zařízení. [1] [5]

#### LaserTRACER-NG

Na obrázku 16, je schéma tohoto zařízení. Uvnitř zařízení je pevná vysoce přesná koule (2) s odchylkou tvaru menší než 50 nm. Tato koule slouží jako referenční reflektor pro interferometr. Kromě toho je koule mechanicky a tepelně oddělena od sledovacího mechanismu pevným čepem (3). Výsledkem je, že koule zůstává stabilní v méně než mikronovém rozsahu během pohybu sledovacího mechanismu. Zároveň jsou vodící chyby horizontální osy a osy otáčení zcela vyloučeny. Interferometr (1) má rozlišení 1 nm v maximálním rozmezí 15 m. Vliv okolních podmínek je kompenzován měřením teploty, tlaku a vlhkosti. Doporučena je sada teplotních snímačů TESTO, které jsou kompatibilní se softwarem, který poskytuje firma Etalon. Laserová trubice je umístěna ve vnější ovládací skříni a je vedena k LaserTRACERU optickým vláknem. Proto není tepelné zatížení výrazné. LaserTRACER může být obsluhován jediným operátorem a je použitelný pro stroje všech pracovních velikostí. [1] [5]



Obr. 16 LaserTRACER-NG [1]

Před samotným měřením pomocí LaserTRACERU se musí zvolit vhodná strategie měření. Strategie je závislá zejména na pracovním prostoru, okolních podmínkách a metodě snímání. Strategie se dá vytvořit v programu TRAC-CAL, která obsahuje mnoho typů kinematických modelů. Nejčastější modely jsou FRB (Full Rigid Body), který je univerzální model a RRB (Reduced rigid body), který se používá nejčastěji pro vertikální frézovací centra, u kterých se nepočítá s rotací nástroje. Po stanovení vhodné strategie měření se LaserTRACER umístí v několika polohách uvnitř pracovního prostoru obráběcího stroje. Počet poloh je závislý

na kinematickém modelu. Například u modelu RRB stačí 4 polohy. Reflektor se nainstaluje na vřeteno stroje. Offsety tohoto reflektoru jsou rovněž závislé na zvoleném kinematickém modelu. Poté už probíhá samotné měření. LaserTRACER sleduje skutečnou dráhu reflektoru v určené dráze pomocí CNC kódu, který vygeneroval program TRAC-CAL. Tento program také vyhodnotí samotné měření a vygeneruje kompenzační program pro volumetrické chyby. [5]

Výhody zařízení LaserTRACER-NG se softwarem TRAC-CAL: [1]

- Jednoduchá kalibrace, testování a volumetrická kompenzace souřadnicových měřicích strojů a obráběcích center
- Úspora časových nákladů ve srovnání s běžnými laserovými interferometry
- Automatický přenos korekčních dat do řídicího softwaru stroje

### LaserTRACER-MT

Použití nástroje LaserTRACER-MT (viz obr. 17) výrazně zlepšuje kalibraci malých až středně velkých nástrojů. V kombinaci se softwarem TRAC-CAL je možno stroje s nejvyšší přesností kalibrovat extrémně rychle, jednoduše a přesně. Všechny kinematické parametry pro plnou kompenzaci TCP (Toll Center Point) v celém objemu stroje lze stanovit s přesností menší než mikron. LaserTRACER-MT se spoléhá na patentovaný sledovací interferometrický systém, který umožňuje získat velmi přesné měření délky v prostoru. Podobně je na tom aktivní systém LaserTRACER, který je vyrobený pro menší stroje, což zaručuje menší náklady na kalibraci. [1]



Obr. 17 LaserTRACER-MT [1]

LaserTRACER-MT je připojen ke stroji vysoce přesnými kulovými klouby, zatímco víceúhlový teleskopický systém je zodpovědný za sledování interferometru. Uvnitř každé koule jsou namontovány speciální reflektory, chráněny před nečistotami a poškozením. Vliv okolních podmínek je kompenzován teplotními a tlakovými senzory, které jsou součástí systému. Laserová jednotka He-Ne se nachází v externí řídicí krabici a přenáší se na LaserTRACER-MT optickým vláknem. Proto je tepelné zatížení výrazně sníženo. Systém obsahuje tři kanály měření teploty s magnetickými snímači materiálu PT100 a vysokorychlostním spouštěcím portem pro synchronizaci se strojem. [1]

Výhody zařízení LaserTRACER-MT se softwarem TRAC-CAL: [1]

- Volumetrická kalibrace kartézských strojů s délkou osy do 1,5 m a kalibrace rotačních os
- Zvýšení geometrické přesnosti o 75 % v průměru s minimálním úsilím oproti běžným měřicím zařízením
- Díky svým rozměrům lze použít na každém místě



Tab 4) Srovnání LaserTRACERŮ [1]

Typ	LaserTRACER-MT	LaseTRACER-NG
Fyzické parametry		
Hmotnost	2,8 kg	8,5 kg
Rozsah		
Azimut	$\pm 270^\circ$	$\pm 225^\circ$
Elevace	$-30^\circ$ až $80^\circ$	$-35^\circ$ až $85^\circ$
Vzdálenost	260 až 940 mm	0,2 až 20 m
Technologie laseru	IFM	IFM
Rozlišení	1 nm	1 nm
Přesnost	1 $\mu\text{m}$	0,2 $\mu\text{m}$ +0,3 $\mu\text{m}/\text{m}$

### 3.2.4 Ballbar

Pod názvem ballbar se pojednává o velmi přesném lineárním snímači a dvojici koulí, které jsou uchyceny na obou koncích. Při diagnostickém testu se kuličky kinematicky uchytí mezi přesné magnetické misky. Jedna z misek je upevněna ke stolu obráběcího stroje a druhá na vřeteně nebo plášť vřeteně. Toto uspořádání umožňuje ballbaru měřit i drobné odchylky poloměru od naprogramované kruhové dráhy. Tento systém reprezentuje nejsnadnější, nejefektivnější a nejrychlejší způsob kontroly stavu obráběcího stroje. Test obráběcího stroje trvá obvykle zhruba deset minut. Princip zkoušky je založen na kruhové interpolaci dvou řízených lineárních os. [3] [5]

#### Výrobci

Mezi nejvýznamnější výrobce patří firma Renishaw se svým systémem ballbar QC20-W (obr. 18). Mezi další výrobce patří například firma Automated Precision Inc. (API). Srovnání těchto dvou ballbaru je znázorněno v tabulce 5. [3] [17]

Systém ballbar QC20-W obsahuje 100 mm dlouhý ballbar a prodlužovací nástavce o rozměrech 50, 150 a 300 mm. Kombinací těchto nástavců se měří poloměr o rozměru 600 mm. Při koupi dalších nástavců je možno měřit až do poloměru 1350 mm. U soupravy pro malé poloměry lze testovat poloměry o velikosti 50 mm. Sestava běžně obsahuje kromě výše uvedených prvků také středový upínač, misku nástroje, nastavovací kuličku, kalibrátor Zerodur, kalibrační protokoly a ověřovací karty zařízení. Kalibrátor Zerodur se vyrábí z materiálu, jehož součinitel teplotní roztažnosti je skoro nulový. Systém umožňuje měřit i v rovinách procházející osou středového upínače testem o  $220^\circ$  (obr. 19), což umožňuje měřit ve třech kolmých rovinách bez přemisťování středového upínače. To znamená, že přístroj provede po sobě dva kruhové oblouky, jak ve směru, tak protisměru hodinových ručiček v testovaných rovinách.



Obr. 18 Ballbar QC20-W [3]

Změří odchylky stroje od naprogramovaného kruhového oblouku. Pro vyhodnocení dat slouží software Ballbar 20, který dokáže vyhodnotit data v souladu s nejnovějšími normami, jako je například ISO230-4. [3]



Obr. 19 Ukázka měření systémem ballbar v rovině ZX [3]

Tab 5) Srovnání ballbarů od firmy Renishaw a API [4] [17]

Výrobce	Renishaw	API
Rozlišení	0,1 $\mu\text{m}$	0,075 $\mu\text{m}$
Přesnost	$\pm 0,5 \mu\text{m}$	$\pm(0,5+0,1 \% L)$
Rozsah měření	$\pm 1,0 \text{ mm}$	$\pm 1,5 \text{ mm}$
Max. rychlost snímání	1000 Hz	1000 Hz
Přenos dat	Bluetooth	Bluetooth

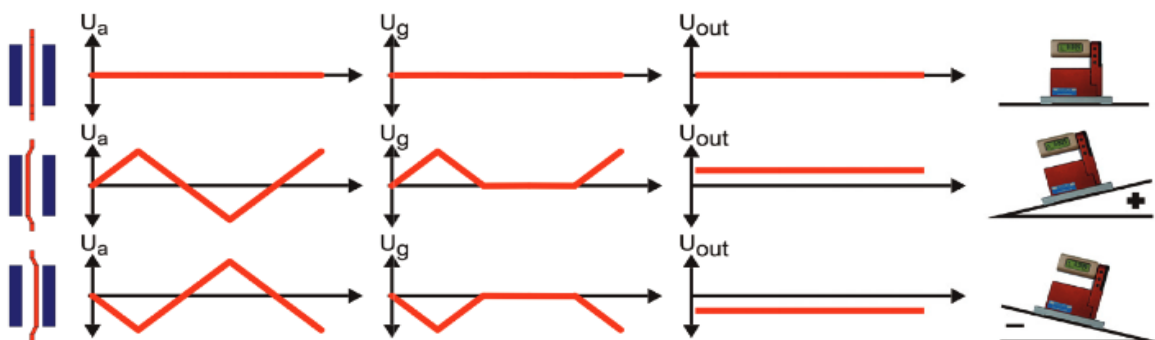
### 3.2.5 Digitální libely

V dnešní době je na trhu digitálních libel spousta. Jeden z nejvýznamnějších výrobců je firma Wyler AG, které dodává svůj produkt pod názvem Bluesystem. Toto zařízení se skládá obvykle z jednoho nebo dvou měřících přístrojů BlueLevel (obr. 20) a zobrazovací jednotky BlueMeter sigma. BlueMeter sigma lze připojit k počítači s vyhodnocovacím softwarem, který umožňuje online vyhodnocení a prezentaci hodnot. Připojení může být kabelové, ale také bezdrátové pomocí bluetooth. Tento systém se používá zejména pro měření rovinnosti povrchu desek nebo měření geometrie obráběcích strojů. [20]



Obr. 20 Měřící zařízení BlueLevel [20]

Pro toto zařízení byl navržen nový kyvadlový systém, který je založen na vlastnostech kyvadlového disku. Dvojfázová frekvence (2,9 kHz) je dodávána na dvě elektrody, které spolu s kyvadlovým diskem tvoří diferenciální kondenzátor. Tyto disky jsou umístěny ve stíněné a prachotěsné štěrbíně mezi oběma elektrodami. Sklonový signál je vytvořen na kyvadle. Vzhledem k rotační symetrii snímače má sklon kolmý k ose měřicího rozsahu zanedbatelný vliv na měření. Stíněný snímač a kapacitní měřicí princip činí systém velmi necitlivý vůči magnetickým a elektrickým polím. Tímto kyvadlovým systémem byly dosaženy extrémně přesné výsledky týkající se opakování a hystereze v kombinaci s velmi krátkými reakčními časy. Princip vyhodnocení sklonového signálu je na obrázku 21. [20]



Obr. 21 Princip měření pomocí zařízení BlueLevel [20]

### 3.2.6 ANALYZER systém

ANALYZER systém vyrábí společnost IBS Precision Engineering. Tato společnost nabízí dva typy analyzérů - Position Analyzer a Rotary Analyzer. [21]

Systém Position Analyzer poskytuje jednoduchý a výkonný princip pro měření 3D polohování. Chyby přímosti stroje se řídí normou ISO 230. Geometrické odchylky se určují měřením kalibrovaného kulového svazku. Tento svazek obsahuje přesné koule o průměru 22 mm. Měření probíhá pomocí patentované Trinity (obr. 22) nebo Tritonové sondy, která měří současně souřadnice X, Y a Z. Sonda má velký rozsah, což umožňuje jednoduché nastavení bez postupů vyrovnání. [21]

Systém Rotary Analyzer funguje pomocí patentované sondy Trinity a Triton, která určí umístění hlavní koule přesně ve všech 3 rozměrech (x, y, z) současně. Sonda měří skutečnou polohu této koule, která je namontována na rotující části stroje. Sonda je upevněna na nerotující části stroje. Software lze snadno naprogramovat tak, aby prováděl řadu uživatelsky definovaných testů, včetně standardních měření ISO. Provádí se statické i dynamické testy. [21]



Obr. 22 Sonda Trinity v praxi [21]



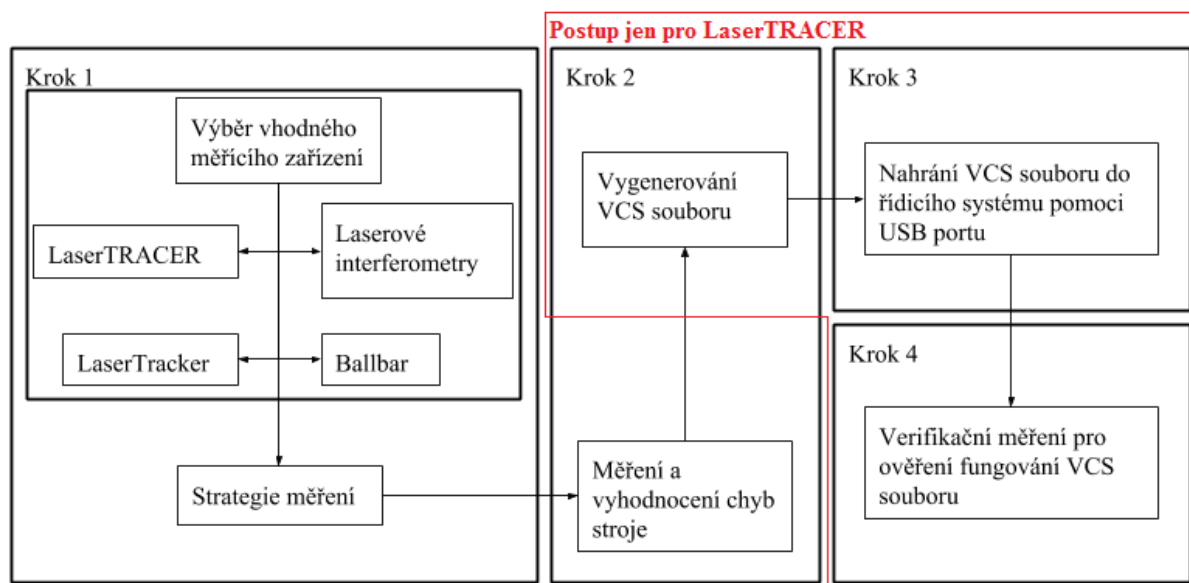
### 3.3 Zavádění volumetrické kompenzace na řídicím systému Siemens

Společnost Siemens nabízí CNC řídicí systém pod názvem SINUMERIK. Na trhu jsou tři typy tohoto řídicího systému - SINUMERIK 808, 828 a 840. Z těchto tří nabízených řídicích systémů umožňuje volumetrickou kompenzaci pouze SINUMERIK 840 (obr. 23). SINUMERIK 840 tvoří kompaktní digitální systém, ideálně pro střední až horní výkonnostní rozsah, díky integrovanému pohonnému systému SINEMICS S120 s automatizačním systémem SIMATIC S7-300. Tento řídicí systém se používá například pro vrtání, broušení, frézování, laserové obrábění, děrování apod. Mezi hlavní výhody tohoto řídicího systému patří vynikající výkon a flexibilita pro víceosé systémy a integrované bezpečnostní funkce pro člověka a stroj. [4]



Obr. 23 Ovládací panel SINUMERIK 840 [4]

Na obrázku 24 je schéma zavádění volumetrické kompenzace do obráběcích strojů. V tomto případě se jedná o řídicí systém SINUMERIK 840, který využívá zkratku VCS



Obr. 24 Postup zavádění volumetrické kompenzace do obráběcího stroje [2]

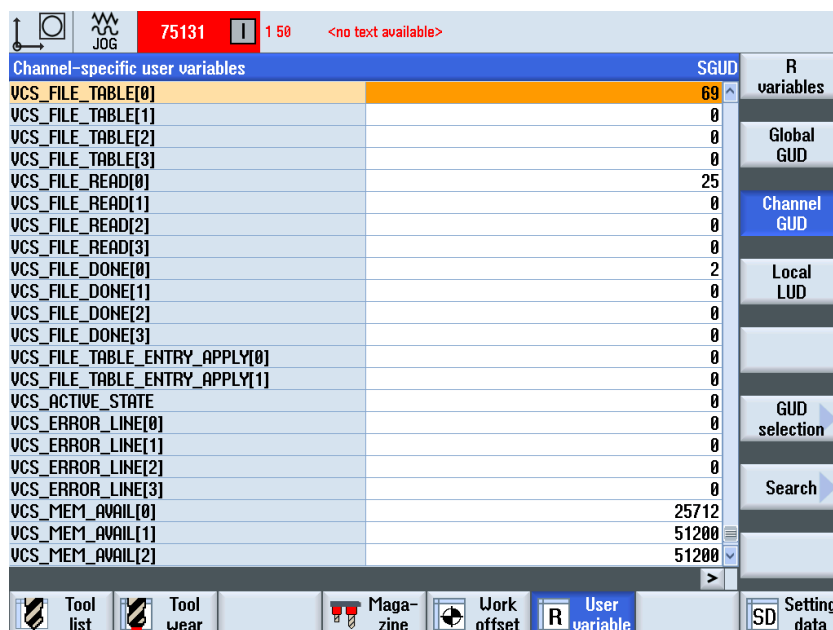
(Volumetric Compensation System), pro tuto kompenzaci. V prvním kroku se vybere vhodné měřicí zařízení. Tyto zařízení jsou uvedeny v kapitole 3.2. Každé z uvedených zařízení má své klady a zápory, co se týče nejistoty měření a náročnosti. Po vhodně zvoleném zařízení se musí zvolit správná strategie měření, která je závislá na pracovním prostoru, okolních podmínkách a metodě snímání. Například u zařízení LaserTRACER nabízí softwarový program TRAC-CAL několik výpočtových modelů, mezi které patří například model FRB nebo RRB. Volba modelu ovlivňuje náročnost měření. Správně nastavené strategie měření se ověří simulací zaleženou na statistické metodě Monte Carlo. Po dosažení potřebných hodnot (ze simulace) následuje druhý krok - kalibrační měření. Na základě tohoto měření jsou vypočítány kalibrační hodnoty, které jsou následně vygenerované do kompenzačních tabulek. Ukázka kompenzační tabulky je na obrázku 25. Z hlavičky tabulky lze vyčíst, o jaký přístroj se jedná, jaký má řídicí

system, kdo kompenzaci prováděl, nastavení měření a část první chyby EXX. Jedná se o chyb přesnosti najetí do polohy v ose X. Kompenzace chyby EXX je jenom 1 z 21. Výčet geometrických chyb je v tab. 1. Po vygenerování VCS souboru se tato kompenzační tabulka nahraje do řídicího systému SINUMERIK 840 pomocí USB portu a aktivuje se. Volumetrická kompenzace se aktivuje v okně - viz. obrázek 26. Parametr VCS\_FILE\_TABLE[0] se musí přepsat podle názvu VCS souboru (např. když se souboru jmenuje VCS69\_1, hodnota se přepíše na 69). Díky toho se tabulka načte. Následně se přepíše hodnota u parametru VCS\_FILE\_TABLE[0] na 1. Tímto krokem se tabulka aktivuje. Pokud aktivace proběhla správně, automaticky se přepíše parametr VCS\_FILE\_DONE[0] na 1. Posledním krokem, po správném načtení kompenzačních tabulek, je verifikační měření, které ověří fungování této kompenzace. Verifikační měření se nejčastěji provádí pomocí zařízení ballbar principem kruhové interpolace. Toto měření zkrátí celkovou dobu nasazení kompenzace. [2] [22]

```
//TRAC-CAL:SiemensVCS, Version: V30, Build: 60 ,2018-02-02
//
[HEADER]
MACHINE_PRODUCER      = KOVOSVIT-MAS
MACHINE_TYPE           = MCV 754 QUICK
MACHINE_NUMBER         = 805
CONTROL_PRODUCER       = SIEMENS
CONTROL_TYPE           = 840D
CONTROL_NUMBER         = -
CONTROL_SOFTWARE_VERSION = 6.5
CUSTOMER               = -
OPERATOR               = Máčala
DATE                   = 07-Jan-2019 10:53:39
TEMPERATURE            = -
COMMENT                = Diplomová práce

[CONFIGURATION]
FILE_TYPE              = VCS
FILE_VERSION           = 5.4
APPLIED_CHANAX_NAME_X  = XC
APPLIED_CHANAX_NAME_Y  = YC
APPLIED_CHANAX_NAME_Z  = ZC
AXIS_OFFSET_X          = 0.0
AXIS_OFFSET_Y          = 0.0
AXIS_OFFSET_Z          = 0.0
LENGTH_UNIT [L_U]     = mm
ANGLE_UNIT [A_U]       = rad
INTERPOLATION_BOUNDARY = 20
KINEMATIC_TYPE         = FXYZ
SQUARENESS_IS_POSITIVE = RIGHT_HANDED
|
[EXX] // XTX
AXIS_LENGTH [L_U]      = 755.0
INTERVAL [L_U]         = 5.00
DEVIATION [L_U]
GRIDPOINTS = {
    0.0 -0.000070245102
    5.0 -0.000068981821
    10.0 -0.000067713440
    15.0 -0.000066438137
    20.0 -0.000065154090
    25.0 -0.000063859495
    30.0 -0.000062553219
```

Obr. 25 Část kompenzační tabulky

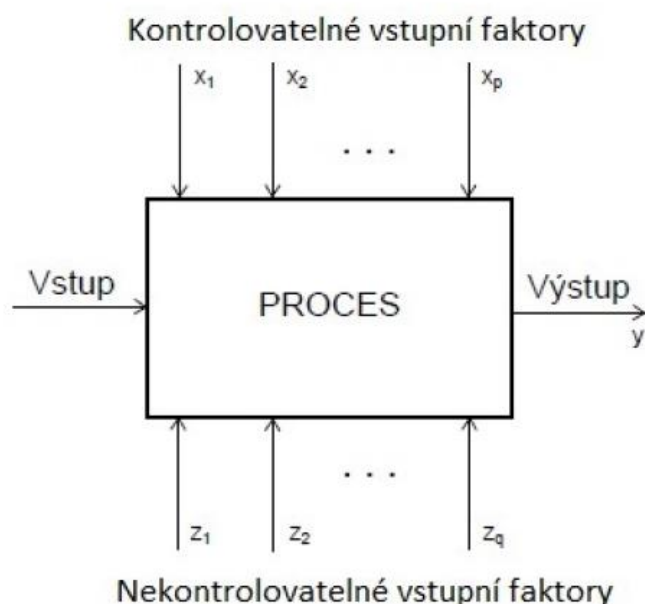


Obr. 26 Princip aktivace VCS na řídicí jednotce

## 4 PLÁNOVANÝ EXPERIMENT

Plánovaný experiment je zkouška nebo posloupnost zkoušek, ve kterých se účelově mění vstupní faktory procesu. Dělí se to proto, aby bylo možné pozorovat a identifikovat odpovídající změny výstupní proměnné (odezvy). [23]

Na obrázku 27 je znázorněn základní model procesu nebo systému. Každá proces má nějaké vstupy (kontrolovatelné nebo nekontrolovatelné) a výstupy. Kontrolovaný vstupní faktor je takový, který může být v průběhu procesu změněn. Naopak nekontrolovatelný vstupní faktor nemůže být změněn, ale je možné ho sledovat. Například u našeho experimentu s volumetrickou kompenzací se bere jako kontrolovaný vstupní faktor stabilita paprsku laseru, a naopak mezi nekontrolovatelné vstupní faktory se řadí teplota okolí, která se nedá měnit, ale je ji možné sledovat. [24]



Obr. 27 Základní model procesu [24]

### 4.1 Historie

Historie vývoje plánovaného experimentu se dá rozdělit do čtyř časových úseků: [23] [24]

- Polnohospodářská éra (1918-1940): Tento časový úsek se pojí hlavně s anglickým matematikem R.A.Fischerem, který pracoval jako dvorní statistik v královské zemědělské experimentální stanici. Zde analyzoval a zpracovával výzkum účinku hnojiv na pěstování obilí. V tomto období položil základy ANOVA (analýza rozptylu), faktorovému návrhu a objevil poznatky, které vedly k zavedení základních principů plánovaného experimentu - znáhodnění, replikace a blokování.

- První průmyslová éra (1951-1970): Vyvinuta nová metoda odezvových ploch. Na tuto metodu přišli Box a Wilson. Zjistili, že na rozdíl od experimentu v zemědělské sféře mají experimenty v průmyslu rychlejší odezvu. K určení důležitých informací stačí menší množství opakování. Plánovaný experiment se kromě zemědělství dostal do chemického a procesního průmyslu.
- Druhá průmyslová éra (1970-1990): Zájem o zlepšení kvality průmyslu v západních zemích. Hlavním představitelem byl Genichi Taguchi s jeho filozofií robustnosti. Práce tohoto japonského statistika se rozšířila do dalších odvětví průmyslu. Zejména do automobilového a leteckého průmyslu. Tato metoda je používána v Japonsku od roku 1965. Byla zavedena také v USA od roku 1980 a v Německu od roku 1985.
- Moderní éra: Zájem o plánovaný experiment v akademické sféře a v praxi. Plánovaný experiment se zavádí do učebních osnov mnohých celosvětových universit.

## 4.2 Použití plánovaného experimentu

Plánovaný experiment se v dnešní době využívá v mnoha odvětvích. Nejčastěji se však používá v inženýrství, kde se zvyšuje výkonnost výrobních procesů. Je velmi důležitý zejména při vývoji nových procesů. Na začátku vývoje může poskytnout řadu kladných dopadů, mezi které patří: [23]

- Snížení celkových nákladů
- Zmenšení doby vývoje
- Snížení ztrát procesů
- Zvýšení spokojenosti zákazníka
- Snížení rozptylu (variability) procesu
- Snížení objemu nezužitkováného materiálu

## 4.3 Základní principy

Základními principy plánovaného experimentu jsou: [25]

- Replikace
- Blokování
- Znáhodnění

Replikace a blokování se využívají zejména pro zlepšení přesnosti v experimentu. Znáhodnění slouží ke snížení zkreslení tohoto experimentu. Všechny tyto principy by se měly objevit v každém experimentu.

### 4.3.1 Replikace

Replikace je opakování experimentu nebo vybrané části. Využívá se proto, aby bylo možné změřit rozptyl náhodné složky. Replikace umožňuje získat odhad chyby experimentu a přesnější odhad vzájemného působení mezi různými faktory. Jelikož každá replikace je časově a zároveň finančně náročná, musí se volit počet replikací rozumně. [25]

### 4.3.2 Blokování

Blokování je rozdělení experimentu do bloku. Tato metoda se používá k redukci nebo odstranění variability náhodných faktorů, které není možné znáhodnit. Tato variabilita je přenášena z nežádoucích zdrojů. Tyto zdroje mají přímý vliv na odezvu experimentu, ale nejsou přímým zájmem experimentu. Všeobecně platí, že blok je soubor relativně homogenních experimentálních podmínek. Uspořádáním těchto náhodných faktorů do bloku se eliminují nežádoucí zdroje proměnlivosti. [25]

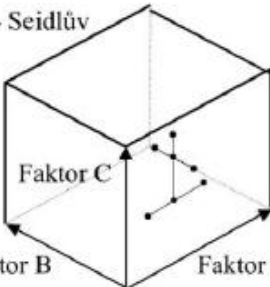
### 4.3.3 Znáhodnění

Znáhodněním se snižuje dopad systematických vlivů u prováděného experimentu. Předpokládá se vzájemná nezávislost jednotlivých měření, která zaručuje právě znáhodnění. Znáhodnění zaručuje, že úrovně, či jejich kombinace se střídají náhodně a že pořadí provádění daného měření není systematické, ale také náhodné. [25]

## 4.4 Základní kroky pro plánování experimentu

Plánovaný experiment se z hlediska přístupu a metodiky rozděluje na klasický (podle Fishera) a na moderní (podle Taguchiho a Shainina). Tyto tři postupy mají však stejné kroky ve fázi plánování. Kromě fáze plánování existuje 7 klíčových kroků pro plánovaný experiment, které jsou u těchto postupů podobné a to zejména: [26]

1. **Definice a popis problému:** Prvním klíčovým krokem je pochopit a rozpoznat problém, který je třeba řešit. Jasně definovaný problém je zásadní pro zajištění plného pochopení problému. Tento krok by měl definovat zodpovědný pracovník za projekt nebo zkoušky.
2. **Výběr sledované proměnné (odezvy):** Výběr vhodné odezvy je důležitý pro úspěšné provedení plánovaného experimentu. Tato odezva je potom tzv. jakostní ukazatel, který poskytuje užitečnou informaci o procesu. Pokud je to možné, měl by tento ukazatel být měřitelnou veličinou.
3. **Výběr faktorů a jejich úrovní:** Faktory jsou konstrukční parametry nebo proměnné, které mají přímý dopad na sledovanou odezvu. Jsou obvykle identifikovány na základě zkušeností projektantů nebo prostřednictvím třídícího experimentu. Vybírají se hlavně důležité faktory, jelikož s každým faktorem navíc roste i náročnost experimentu. Naopak úroveň je hodnota nebo podmínka faktoru. Nejčastěji se uvažují dvě úrovně za předpokladu lineárního průběhu.
4. **Výběr typu plánovaného experimentu:** Výběr vhodného typu plánu zkoušky je závislá na počtu faktorů a jejich úrovní, počtu replikací, použití blokování nebo znáhodnění. Příklady pro klasické plánování zkoušky jsou na obrázku 28.
5. **Provedení experimentu:** V tomto kroku se provede experiment na základě vybraného plánu zkoušky. Úspěšné měření je také závislé na spolehlivosti a opakovatelnosti zařízení a měřicího systému.
6. **Analýza dat:** V této fázi jsou data, která se získala z experimentu, statisticky analyzována. Tato analýza se většinou provádí pomocí vhodného statistického softwaru.
7. **Závěry a doporučení:** Konečným krokem v plánovaném experimentu je vyvodit praktické závěry a doporučit nastavení návrhových parametrů, které optimalizují sledovanou odezvu.

Typ	Plán zkoušek	Poznámka																																																																								
Jednofaktorový	<table><tr><th></th><th>A</th><th>B</th><th>C</th><th>D</th><th>E</th><th>F</th><th>G</th></tr><tr><td>1</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>2</td><td>+</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>3</td><td>+</td><td>+</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>4</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>5</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>6</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>7</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>-</td></tr><tr><td>8</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td></tr></table>		A	B	C	D	E	F	G	1	-	-	-	-	-	-	-	2	+	-	-	-	-	-	-	3	+	+	-	-	-	-	-	4	+	+	+	-	-	-	-	5	+	+	+	+	-	-	-	6	+	+	+	+	+	-	-	7	+	+	+	+	+	+	-	8	+	+	+	+	+	+	+	<p>Výhoda: jednoduchá obsluha programu</p> <p>Nevýhoda: není možné poznat vzájemné působení</p>
	A	B	C	D	E	F	G																																																																			
1	-	-	-	-	-	-	-																																																																			
2	+	-	-	-	-	-	-																																																																			
3	+	+	-	-	-	-	-																																																																			
4	+	+	+	-	-	-	-																																																																			
5	+	+	+	+	-	-	-																																																																			
6	+	+	+	+	+	-	-																																																																			
7	+	+	+	+	+	+	-																																																																			
8	+	+	+	+	+	+	+																																																																			
Plně faktorový	<table><tr><th></th><th>A</th><th>B</th><th>C</th></tr><tr><td>1</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>2</td><td>-</td><td>-</td><td>+</td></tr><tr><td>3</td><td>-</td><td>+</td><td>-</td></tr><tr><td>4</td><td>-</td><td>+</td><td>+</td></tr><tr><td>5</td><td>+</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>6</td><td>+</td><td>-</td><td>+</td></tr><tr><td>7</td><td>+</td><td>+</td><td>-</td></tr><tr><td>8</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td></tr></table>		A	B	C	1	-	-	-	2	-	-	+	3	-	+	-	4	-	+	+	5	+	-	-	6	+	-	+	7	+	+	-	8	+	+	+	<p>Výhoda: vysoká vypovídací schopnost</p> <p>Nevýhoda: velmi nákladné při vyšším počtu faktorů</p>																																				
	A	B	C																																																																							
1	-	-	-																																																																							
2	-	-	+																																																																							
3	-	+	-																																																																							
4	-	+	+																																																																							
5	+	-	-																																																																							
6	+	-	+																																																																							
7	+	+	-																																																																							
8	+	+	+																																																																							
Částečně faktorový	<table><tr><th></th><th>A</th><th>B</th><th>C</th><th>D</th><th>E</th><th>F</th><th>G</th></tr><tr><td>1</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td></tr><tr><td>2</td><td>+</td><td>+</td><td>+</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>3</td><td>+</td><td>-</td><td>-</td><td>+</td><td>+</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>4</td><td>+</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>+</td><td>+</td></tr><tr><td>5</td><td>-</td><td>+</td><td>-</td><td>+</td><td>-</td><td>+</td><td>-</td></tr><tr><td>6</td><td>-</td><td>+</td><td>-</td><td>-</td><td>+</td><td>-</td><td>+</td></tr><tr><td>7</td><td>-</td><td>-</td><td>+</td><td>+</td><td>-</td><td>-</td><td>+</td></tr><tr><td>8</td><td>-</td><td>-</td><td>+</td><td>-</td><td>+</td><td>+</td><td>-</td></tr></table>		A	B	C	D	E	F	G	1	+	+	+	+	+	+	+	2	+	+	+	-	-	-	-	3	+	-	-	+	+	-	-	4	+	-	-	-	-	+	+	5	-	+	-	+	-	+	-	6	-	+	-	-	+	-	+	7	-	-	+	+	-	-	+	8	-	-	+	-	+	+	-	<p>Výhoda: nízký počet zkoušek při vysokém počtu faktorů</p> <p>Nevýhoda: špatný výsledek při podcenění vzájemných působení</p>
	A	B	C	D	E	F	G																																																																			
1	+	+	+	+	+	+	+																																																																			
2	+	+	+	-	-	-	-																																																																			
3	+	-	-	+	+	-	-																																																																			
4	+	-	-	-	-	+	+																																																																			
5	-	+	-	+	-	+	-																																																																			
6	-	+	-	-	+	-	+																																																																			
7	-	-	+	+	-	-	+																																																																			
8	-	-	+	-	+	+	-																																																																			
Kvadratický	<div><div>Faktor 2</div><table><tr><th colspan="2"></th><th colspan="5">Faktor 1</th></tr><tr><th></th><th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th><th>5</th></tr><tr><td>1</td><td>A</td><td>B</td><td>C</td><td>D</td><td>E</td></tr><tr><td>2</td><td>B</td><td>C</td><td>D</td><td>E</td><td>A</td></tr><tr><td>3</td><td>C</td><td>D</td><td>E</td><td>A</td><td>B</td></tr><tr><td>4</td><td>D</td><td>E</td><td>A</td><td>B</td><td>C</td></tr><tr><td>5</td><td>E</td><td>A</td><td>B</td><td>C</td><td>D</td></tr></table><div>Latinsquare 5 x 5</div></div>			Faktor 1							1	2	3	4	5	1	A	B	C	D	E	2	B	C	D	E	A	3	C	D	E	A	B	4	D	E	A	B	C	5	E	A	B	C	D	<p>Výhoda: jednoduchá obsluha programu, jsou možná víc jak dvě nastavení</p> <p>Nevýhoda: možný pouze pro dva až tři faktory</p>																												
		Faktor 1																																																																								
		1	2	3	4	5																																																																				
1	A	B	C	D	E																																																																					
2	B	C	D	E	A																																																																					
3	C	D	E	A	B																																																																					
4	D	E	A	B	C																																																																					
5	E	A	B	C	D																																																																					
Deterministický	<div>Gauss - Seidlův</div> <div></div>	<p>Výhoda: sleduje optimální směr</p> <p>Nevýhoda: možný pouze pro dva až tři faktory, špatný výsledek podmíněný nelineárním průběhem cílové veličiny a výskytu lokálního optima vzájemného působení</p>																																																																								

Obr. 28 Příklady klasického plánování zkoušek [27]

## 4.5 Klasické plánování experimentu

Při klasickém plánování experimentu je mnoho metod, jak daný problém vyšetřovat. Na obrázku 29 jsou uvedeny příklady těchto metod. [27]

Kvadratické plány	Faktrové plány	Deterministické plány
Latin Square Graeco Latin Square Hyper Graeco Latin Square Youden Square Lattice Square Randomized Blocks	Jednofaktorové Plně faktorové Částečně faktorové Placket Burman Ortogonální	Gauss – Seidlův plán Gradientní plán Simplexní plán

Obr. 29 Typy klasických plánování experimentu [27]

V této části jsou uvedeny faktorové plány zkoušek, které se nazývají také více parametrické zkoušky. Z důvodu co nejmenších nákladů na experiment jsou úrovně faktorů voleny většinou jen na dvě nastavení, za předpokladu linearity.

### 4.5.1 Jednofaktorový plán

Jedná se o nejjednodušší případ faktorového experimentu. U tohoto plánu se vždy při jednotlivé zkoušce změní jiný faktor, jak je prezentováno na obrázku 28. Výhodou tohoto typu je jednoduchost na obsluhu operátora. Naopak nevýhodou této metody je, že nelze posoudit působení změny jednoho faktoru na změnu ostatních faktorů. [27]

### 4.5.2 Plně faktorový plán

Principem tohoto plánu je vystřídání všech faktorů, za účelem vyzkoušení všech možných možností, jak je uvedeno na obrázku 28. Výhodou tohoto plánu je velká posuzovací schopnost faktorů. Naopak mezi nevýhody patří časové a nákladové nároky, kvůli velkému počtu zkoušek, který je závislý na počtu faktorů. [27]

### 4.5.3 Částečně faktorový plán

U tohoto typu plánu se místo naplánování zkoušek pro všechny faktory sestaví plán jen pro několik faktorů. Tyto vybrané faktory se označují jako hlavní faktory a zbylé jako vedlejší faktory, které se vyjadřují pomocí hlavních faktorů. Díky tohoto principu se sníží počet pokusů. Příklad částečného plánu je na obrázku 28. [27]

### 4.5.4 Faktorový plán se sloupci vzájemného působení

V tomto typu plánu jsou kromě faktorů zahrnuty i jejich vzájemné působení. V tabulce 6, je zvláštní připojený sloupec AB, který prezentuje toto vzájemné působení. V tomto případě popisuje působení mezi faktorem A a B. Výsledné znaménko vzájemného působení je dáno násobením znamének příslušných faktorů. [27]

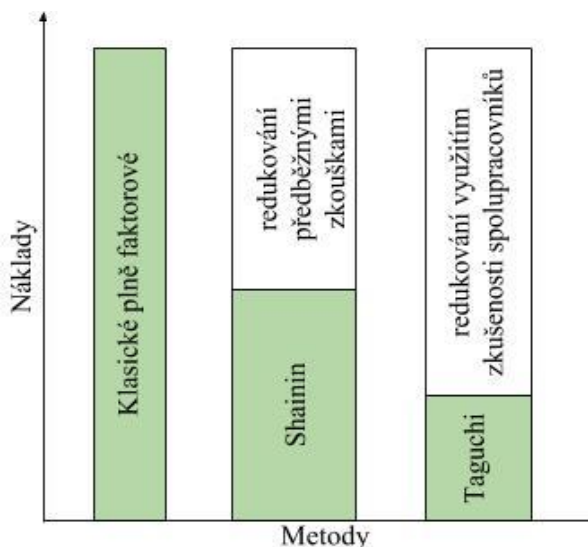
Tab 6) Příklad faktorového plánu se sloupcem vzájemného působení [27]

	A	B	AB
1	-	-	+
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	+



## 4.6 Moderní plánování experimentu

Kromě klasického plně faktorového plánování experimentu existují i moderní metody. V této kapitole se budu zabývat hlavně plánováním podle Shainina a Taguchiho. Těmito metodami se dají výrobky a procesy, které jsou závislé na velkém množství ovlivňujících faktorů, rychleji optimalizovat. Na obrázku 30 lze pozorovat závislost nákladů na různých použitých metodách. V tomto případě jsou náklady chápány jako personál, pořadí zkoušek a čas. Z obrázku je patrné, že nejnáročnější plánovaný experiment je experiment plně faktorového plánu. Naopak nejméně nákladný je plán podle Taguchiho. [27]



Obr. 30 Srovnání metod plánování experimentu [27]

### 4.6.1 Plánování experimentu podle Shainina.

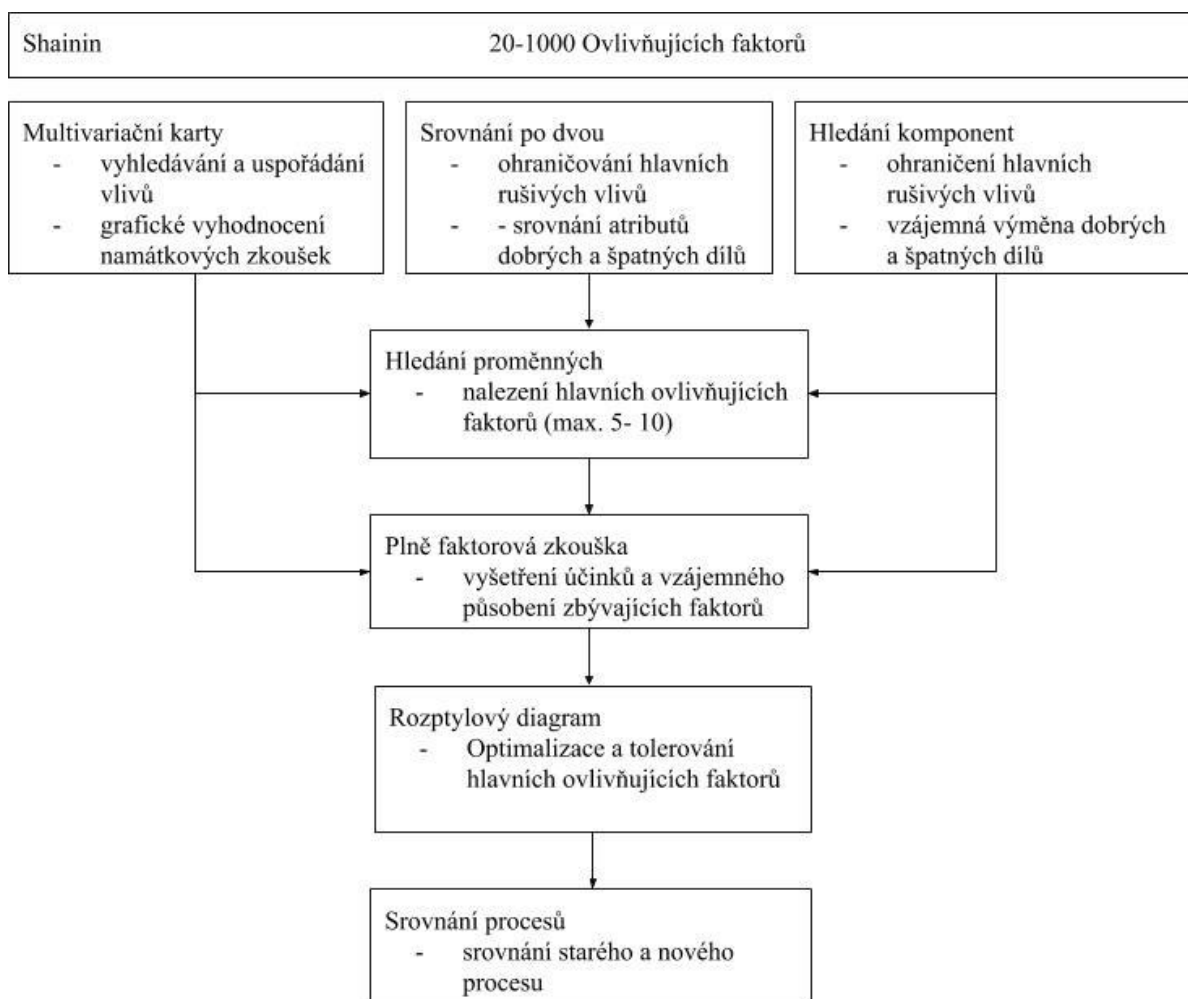
Plánování podle Shainina reprezentuje postup po krocích, který je znázorněn na obrázku 31. Tento postup se aplikuje zejména při optimalizaci výrobních procesů. Tímto postupem může být zkoumáno více faktorů (zhruba do 1000). Z ekonomických důvodů je doporučeno omezit důležité faktory na 100. [27]

Průběh plánovaného experimentu podle Shainina lze popsat v 8 krocích. První tři kroky jsou podobné jako v kapitole 4.4, takže jsou popsány pouze ve zkratce. [27]

- 1. Definice úlohy:** Přesně definovat úlohu nebo problém.
- 2. Skutečný stav:** Uvést skutečný stav se všemi závadami.
- 3. Výpis možných ovlivňujících faktorů:** Vypsát všechny tušené ovlivňující faktory do seznamu. Stanovit jakostní ukazatel tzv. odezvu.
- 4. Předběžný výběr postupu:** zde jsou tři možné postupy:
  - a. Multivariační karty:** Tento postup se používá v běžné výrobě pro vyhledávání ovlivňujících faktorů. Postup spočívá v tom, že se ze série vyjme tři až pět po sobě jdoucích výrobků, které se změří. Tyto naměřené hodnoty se zapíší do karty. Po předem stanovené době se tento postup opakuje se stejným množstvím vzorků. Tento cyklus končí v době, kdy se na kartě objeví 80 % nepřípustnosti rozptylu procesu.
  - b. Srovnání po dvou:** Tato možnost reprezentuje srovnání dobrých a špatných součástí výrobků. Do páru se vždy vezme jedna špatná a jedna dobrá součástka. Rozdíl mezi těmito součástkami musí být zaznamenán. Průběh srovnávání končí, dokud se stanovený rozdíl vícekrát neopakuje.
  - c. Hledání komponentů:** Tato metoda se používá u montážních součástí záměnou dobrých součástí se špatnými součástmi chybného komponentu. Vždy je vybrán jeden dobrý a jeden špatný konstrukční díl, který se rozebere na jednotlivé komponenty. Postupně se vyměňují každé komponenty z dobrého konstrukčního dílu za špatný a naopak. U takto vzniklých konstrukčních dílů se vyhodnocuje sledovaná veličina.



5. **Hledání proměnných:** Již zbylému seznamu ovlivňujících faktorů, které byly vyčleněny ve 4. kroku se přiřadí dvě nastavení (dobrá a špatná hodnota). Dobrá hodnota je hodnota, při které se předpokládá nejlepší výsledek procesu a špatná hodnota je hodnota, u které je výsledek procesu ještě přijatelný. V první řadě se provedou čtyři zkoušky tzv. zavádějící část. První dvě zkoušky s nastavením ovlivňujících faktorů na své dobré nastavení a další dvě zkoušky s nastavením se špatnými hodnotami. Po zavádějící části se každý ovlivňující faktor nastaví na špatnou hodnotu a zbytek ovlivňujících faktorů na dobrou a naopak. Tento postup je ukončen v případě, že se neprostrídají všechny ovlivňující faktory. V některých případech je potřebné vyšetřit i vzájemné působení.
6. **Plně faktorová zkouška:** Ze získaných faktorů z kroku 5 se provede plně faktorová zkouška, která by měla obsahovat nejméně dvě vzájemné působení faktoru. Pro získání dobré střední hodnoty by měly být provedeny nejméně tři replikace. Poté se vyhodnocuje síla reakcí daných faktorů, ze které se zjistí, jak silný je vliv daného faktoru.
7. **Rozptylový diagram:** Po získání nastavení se musí toto nastavení ještě vylepšit. To se provede rozptylovým diagramem, ve kterém se stanoví reálná tolerance výrobku nebo se obalovou křivkou najde optimální bod.
8. **Srovnání procesů:** Hodnota starého procesu se porovnává s novou optimalizovanou hodnotou.



Obr. 31 Schéma průběhu plánovaného experimentu podle Shainina [27]

#### 4.6.2 Plánování experimentu podle Taguchiho

Plánování podle Taguchiho je založeno na částečně faktorovém ortogonálním plánu s markantní úsporou zkoušek, u kterých se v předběžném výběru stanovují jenom silně ovlivňující faktory. V tabulce 7, je znázorněn rozdíl mezi počty zkoušek plně faktorovým plánem a plánem podle Taguchiho. [28]

Tab 7) Srovnání počtu zkoušek mezi plně faktorovým plánem a Taguchiho plánem [28]

Faktorů	Úrovní	Plně faktorový plán	Taguchiho plán
2	2	4 ( $2^2$ )	4
3	2	8 ( $2^3$ )	4
4	2	16 ( $2^4$ )	8
7	2	128 ( $2^7$ )	8
11	2	2048 ( $2^{11}$ )	12
4	3	81 ( $3^4$ )	9

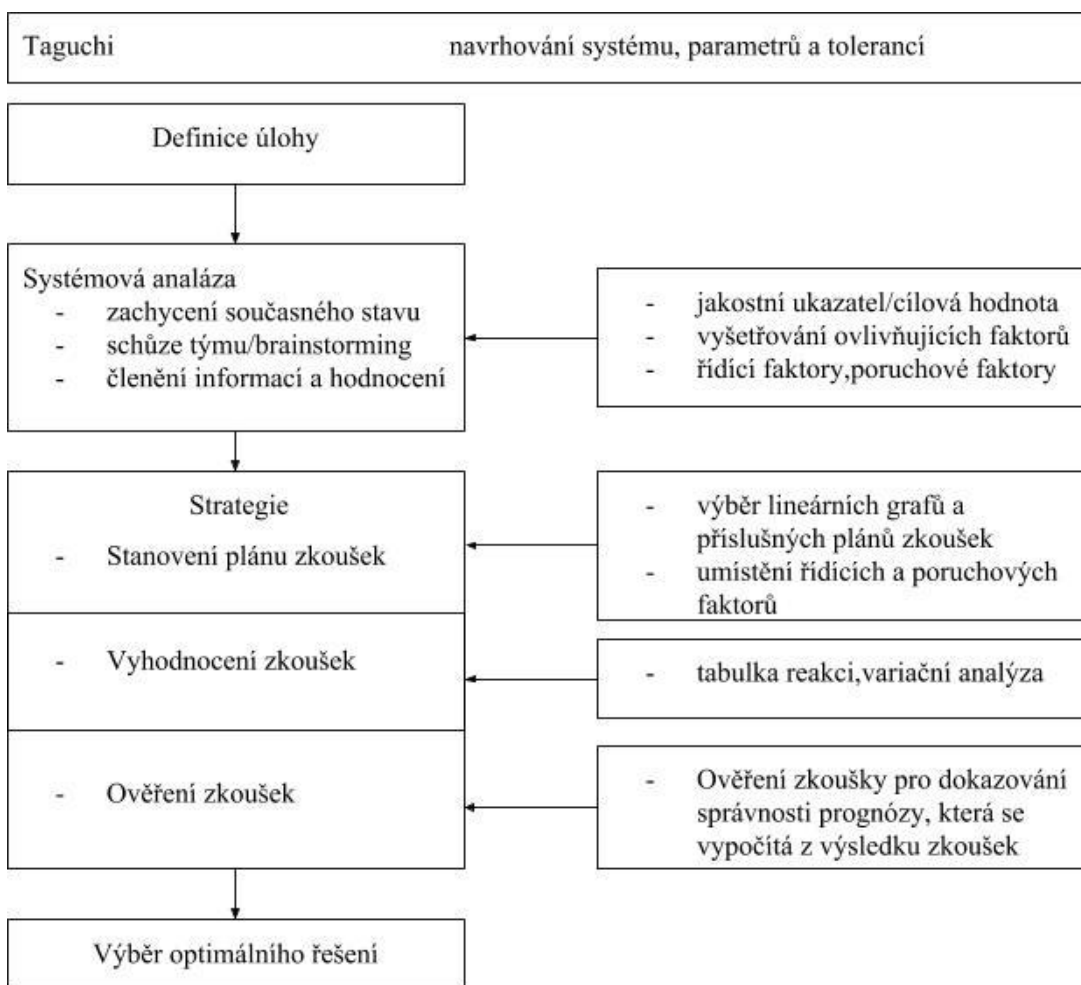
Průběh plánovaného experimentu podle Taguchiho lze popsat v 10 krocích. Schéma tohoto plánu je na obrázku 32. První dva kroky jsou podobné jako v kapitole 4.4, takže budou jen ve zkratce popsány. [27]

- 1. Definice úlohy:** Přesně definovat úlohu nebo problém.
- 2. Skutečný stav:** Uvést skutečný stav se všemi závadami.
- 3. Vytvoření týmu:** Tým má obsahovat 5-8 pracovníků. Aby bylo možno podchytit všechny ovlivňující faktory, měli by tým tvořit odborníci z různých oblastí (např. konstrukce, montáž atd.)
- 4. Brainstorming:** Brainstormingu se zúčastní všichni členové týmu, aby společně diskutovali nad všemi ovlivňujícími faktory. Tyto faktory se rozdělí do dvou skupin.
  - a. Řídící faktory:** Do této skupiny patří všechny ovlivňující faktory, které mohou být měněny, nastaveny nebo kontrolovány.
  - b. Poruchové faktory:** Do této skupiny patří faktory, které nemohou být ovlivněny během zkoušky
- 5. Členění informací a hodnocení:** Vymezí se nejdůležitější ovlivňující faktory, u kterých se zároveň stanoví možné úrovně. Úrovně se nastavují buď na dvě nebo tři možnosti. Tato volba se musí dobře rozhodnout, jelikož tři úrovně zvyšují náklady na zkoušku. Zároveň se musí brát v úvahu poruchové faktory.
- 6. Stanovení plánu zkoušky:** Nalézt vhodný plán zkoušek na základě lineárních grafů. Nesmí se opomenout i možnost vzájemného působení. Zároveň se musí do plánu zahrnout i poruchové faktory, kvůli robustnosti proti všem vnějším poruchovým vlivům.
- 7. Měření:** Měření probíhá podle plánu zkoušek. Pořadí zkoušek může být libovolné, ale bere se ohled na minimální změny v nastavení.
- 8. Hodnocení zkoušek:** Podle výsledku měření se musí rozhodnout, jak mají být výsledky vyhodnoceny. Existují tři způsoby hodnocení:
  - a. Nižší hodnota je lepší:** Ztrátový výkon u převodovky. Zde je nižší hodnota lepší.
  - b. Vyšší hodnota je lepší:** Životnost ložisek. Zde je vyšší hodnota lepší.
  - c. Nulová hodnota je lepší:** Prosakování olejové vany. Nulové (žádné) prosakování je lepší.

Pro tyto tři typy Taguchi navrhl dvě cílové veličiny (střední hodnotu a standardní odchylku veličiny). K vyhodnocení těchto dvou veličin se používá poměr výkonu signálu k výkonu šumu z elektrotechniky (S/N-hodnota). Po vypočítání této hodnoty následuje výpočet průměrného působení obou nastavení každého faktoru. Tyto hodnoty se zapíší do tabulky reakcí, ze které se určí, jaký faktor nebo vzájemné působení má velký vliv. Další částí vyhodnocení je analýza rozptylu, kde je možno zjistit sílu vlivu faktoru na odezvu. Pro správné vyhodnocení rozptylu a chyby měření by měly být jednotlivé zkoušky několikrát opakovány.

**9. Optimální návrh a prognóza:** Optimální kombinace nastavení faktorů může být zřetelná z tabulky reakcí. Dále se aplikují faktory, které v tabulce analýzy rozptylu mají nejvyšší podílovou hodnotu. Z těchto dvou možností se vypočítá prognóza nastavení.

**10. Potvrzovací zkouška:** Taguchi doporučuje, aby se provedla potvrzující zkouška, která potvrdí optimální nastavení navrhovaných faktorů. Jestliže se výsledek této zkoušky shoduje s prognózou, vybrané nastavení faktorů bylo správně zvoleno. Naopak jestli se výsledky neshodují, může to být zapříčiněno vynecháním vzájemného působení některých faktorů.



Obr. 32 Schéma průběhu plánovaného experimentu podle Taguchiho [27]



## 5 DEMONSTRÁTOR

V této diplomové práci se za účelem měření používal stroj MCV 754 QUICK (obr. 33) od společnosti Kovosvit MAS. Jedná se o vertikální obráběcí centrum s řídicím systémem SINUMERIC 840D sl od společnosti Siemens. Technické parametry stroje jsou uvedeny v tabulce 8. [29]



Obr. 33 MCV 754 QUICK [29]

Tab 8) Technické parametry MCV 754 QUICK [29]

Pracovní rozsah	[mm]	X-osa	754
	[mm]	Y-osa	500
	[mm]	Z-Osa	550
Přesnost ČSN ISO 230-2	[mm]	Přesnost nastavení plochy	0,012
	[mm]	Opakovatelnost nastavení polohy	0,005
Stůl	[mm]	Upínací plocha stolu	1000x500
	[kg]	Maximální zatížení stolu	400
Vřeteno	[min <sup>-1</sup> ]	Max. otáčky	10000
Posuv	[mm.min <sup>-1</sup> ]	Pracovní posuv X, Y, Z	1- 30 000
	[m.min <sup>-1</sup> ]	Rychloposuv X, Y, Z	30



## 6 EXPERIMENT

Experiment probíhal v prostorách ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky v laboratoři C1/118. Jak bylo popsáno v kapitole 5, měření se uskutečnilo na přístroji MCV 754 QUICK. Kromě tohoto vertikálního obráběcího centra byly použity přístroje LaserTRACER od společnosti Etalong AG, popsány v kapitole 3.2.3 a ballbar QC20-W od společnosti Renishaw, popsány v kapitole 3.2.4. Cílem experimentu bylo zjistit, zda existuje závislost mezi velikostí kompenzovaného prostoru a výslednou přesností malého obráběcího stroje.

### 6.1 Plán experimentu

Experiment se naplánoval podle moderního postupu, a to cestou podle Shainina uvedeného v kapitole 4.6.1. Úloha byla definována následovně: zda existuje závislost mezi velikostí kompenzovaného prostoru a výslednou přesností malého obráběcího stroje. Současný stav je takový, že se kompenzuje většinou celý pracovní prostor obráběcích center i když je tento prostor využíván celý jen zřídka a obrábí se především na určité straně pracovního prostoru.

Na začátku experimentu byly vybrány 3 ovlivňující faktory, které byly zároveň stanoveny jako hlavní faktory. Přehled těchto faktorů s nastavením je v tabulce 9.

Tab 9) Seznam hlavních faktorů a jejich nastavení

Označení	Pojmenování	Nastavení		
		Dobré (+)	Špatné (-)	Střed (0)
A	Velikost prostoru	WS1	WS3	WS2
B	Stabilita laseru	3	5	
C	Počet interpolačních bodů	11	6	

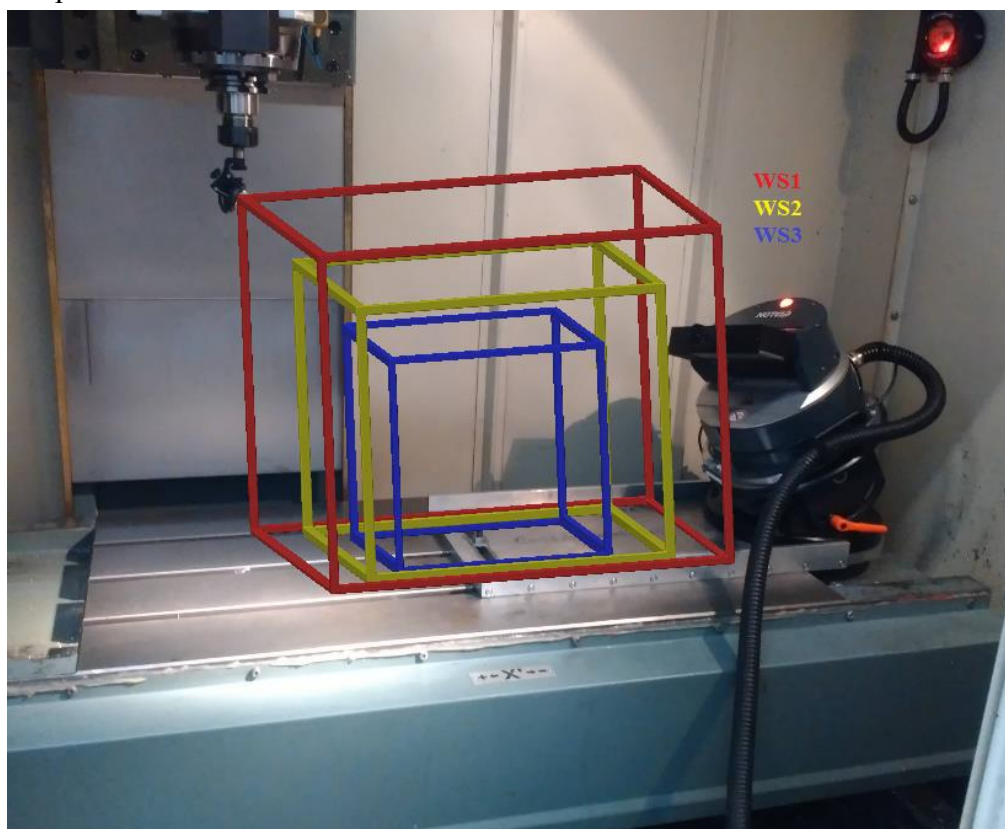
Jeden z hlavních faktorů je velikost prostoru. Tyto prostory, jsou vyobrazeny na obrázku 34. Tento faktor má 3 nastavení, jelikož se zde neuvažuje lineární závislost. Prostor WS1 je největší, naopak WS3 nejmenší (viz tabulka 10). Všechny tři prostory mají společnou spodní rovinu a střed této roviny. Tato rovina leží ve výšce  $Z = -450$ . Na obrázku 35 je znázorněno z jakých důvodů nemůže ležet spodní rovina na dně pracovního prostoru ( $Z = -550$ ). Kdyby ležela spodní rovina ve výšce  $Z = -550$ , bylo by podle obrázku zřetelné, že prostor mezi upínákem nástroje a dnem pracovního stolu je 105 mm. Do této mezery se musí vejít off-set, který má velikost 122 mm a podložka pod LaserTRACER, která má velikost 45 mm. Po součtu těchto dvou faktorů je rozměr větší než 105 mm.

Tab 10) Velikost prostorů

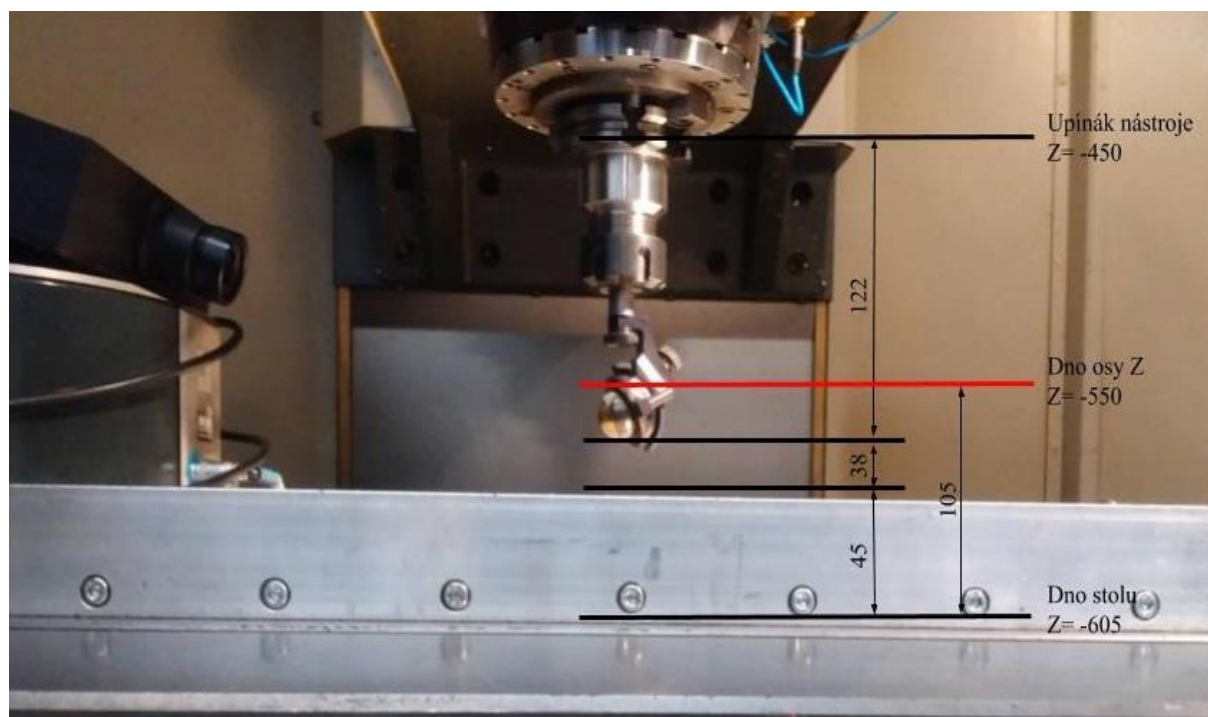
Prostor	Délka osy [mm]			Objem [m <sup>3</sup> ]
	X	Y	Z	
WS1	600	500	450	0,135
WS2	460	410	385	0,073
WS3	320	320	320	0,033

Nejmenší prostor byl volen s ohledem na to, že se do objemu tohoto prostoru musí vejít měřicí systém ballbar QC20-W s poloměrem 150 mm. Proto délky všech stran tohoto prostoru byly zvoleny na 320 mm. Největší prostor byl volen s ohledem na umístění LaserTRACERU, který ovlivňoval jen velikost osy x. U zbylých os byl využit maximální prostor, a to u osy y 500 mm a u osy z 450 mm. U osy x byl zvolen rozměr 600 mm. Střední prostor byl zvolen, jako střední vzdálenost mezi prostory WS1 a WS2.

Hlavním jakostním ukazatelem byla vybraná velikost volumetrické odchylky. Mezi další jakostní ukazatele, které úzce souvisí s volumetrickou odchylkou, byly vybrány kolmost, přímost, najetí do polohy a kruhovitost. Mezi rušivé faktory, které se měřily, patří teplota stroje a teplota prostředí.



Obr. 34 Zkoumané prostory

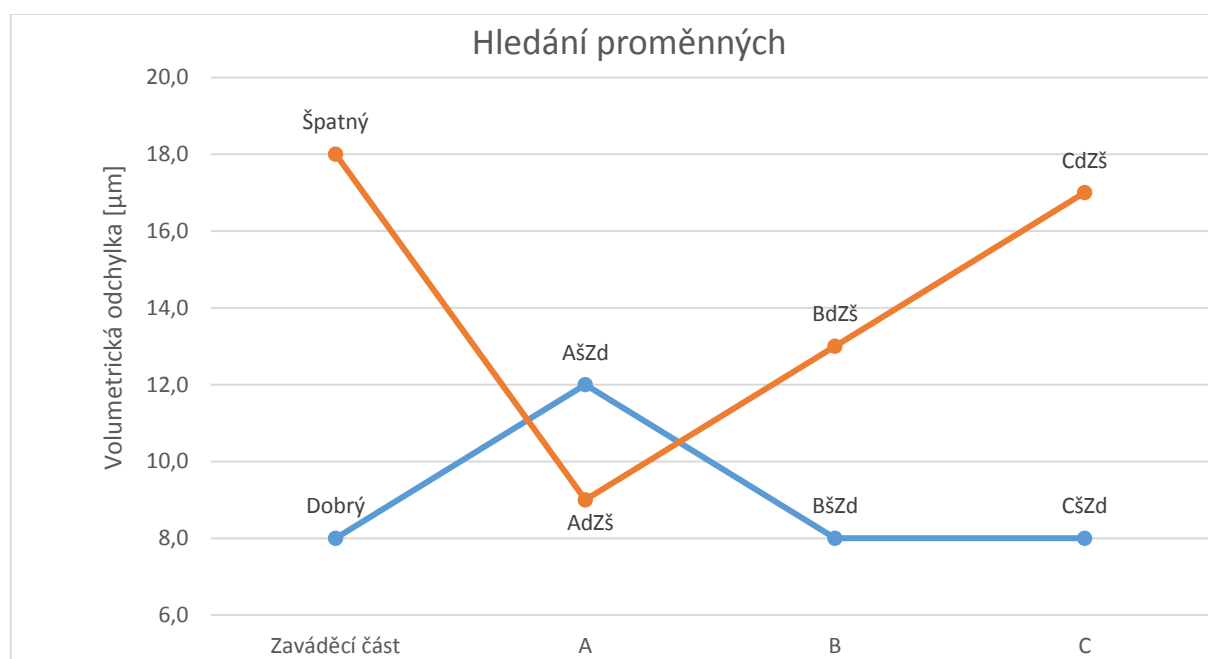


Obr. 35 Výška spodní roviny



Pro předběžné zjištění, jestli jsou ovlivňující faktory významné, bylo provedeno grafické znázornění naměřených dat, které jsou na obrázku 36. Na tomto grafu lze vidět prvotní zaváděcí část, ve které jsou faktory nastaveny na předpokládané dobré a špatné nastavení. Podle Shainina (kapitola 4.6.1) má být tato část provedena 2x.

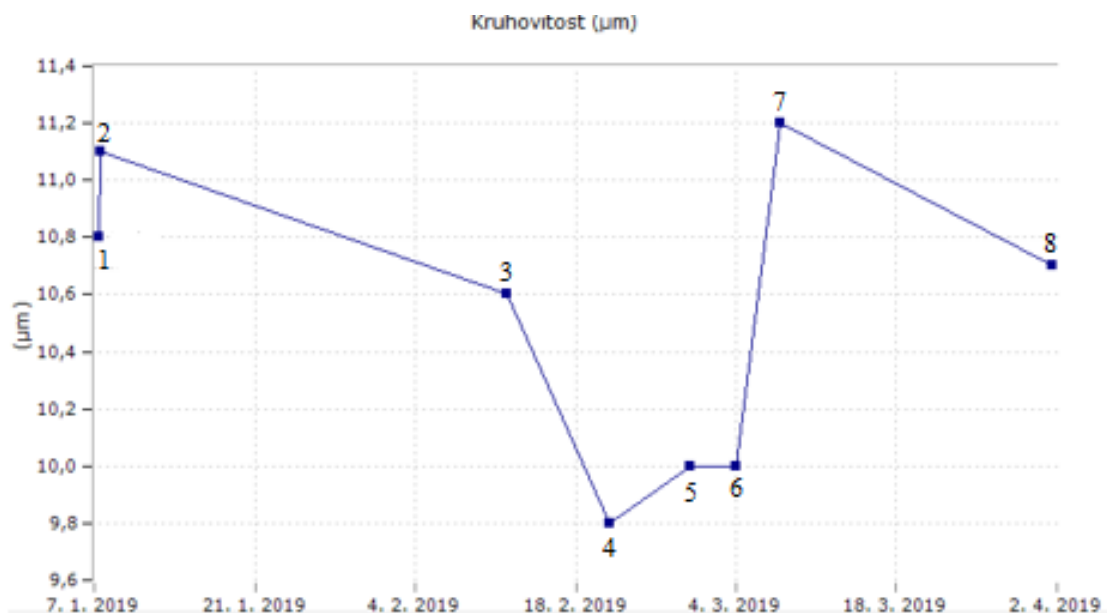
V tomto experimentu byla tato část změřena pouze 1x, z důvodu dobré opakovatelnosti obráběcího stroje v rámci změn teplot na stoju, který je doložen na obrázku 37. Na tomto obrázku, je znázorněn trend měření kruhovitosti s vypnutými kompenzacemi, kde rozptyl kruhovitosti je menší než 2  $\mu\text{m}$ . I když hodnoty kolísají, je toto kolísání způsobené změnou teplot. Například body na obrázku 1, 3 a 8 mají kruhovitosť 10,8  $\mu\text{m}$ ; 10,6  $\mu\text{m}$  a 10,7  $\mu\text{m}$ . Rozdíl mezi těmito body je jen 0,2  $\mu\text{m}$  a teplotní rozdíl 0,4  $^{\circ}\text{C}$  (nejvyšší teplota je 23,0  $^{\circ}\text{C}$  a nejnižší 22,6  $^{\circ}\text{C}$ ). Podobné podmínky platí pro skupinu bodů 2, 7 a skupinu bodů 4, 5, 6. U těchto tří skupin bodů vyšla kruhovitosť v rovině XY podobně, při velmi podobných teplotních podmínkách stroje.



Obr. 36 Hledání proměnných

Po zaváděcí části se u každého ovlivňujícího faktoru provedly dvě zkoušky. Nejprve se u pozorovaného faktoru nastaví dobrá hodnota (AdZš, BdZš, CdZš) a u zbylých faktorů špatná hodnota. Poté se nastaví u sledovaného faktoru špatná hodnota (AšZd, BšZd, CšZd) a u zbylých faktorů dobrá hodnota.

Z obrázku 36 vyplývá, že faktor A (prostor) bude pravděpodobně významný, u faktoru B (stabilita laseru) bude pravděpodobně významná nějaká interakce a faktor C (počet interpolačních bodů) nebude pravděpodobně významný. Tyto předběžné tvrzení budou potvrzeny nebo vyvráceny pomocí statistického vyhodnocení dat, které bude vyhodnoceno v kapitole 7.



Obr. 37 Graf trendu kruhovitosti při vypnutých kompenzacích

Pro tento experiment se třemi hlavními faktory byl navržen plně faktorový plán zkoušek, který je uveden v tabulce 11. Tento plán byl vytvořen pomocí software Minitab 17. Z tabulky lze vyčíst, že počet replikací experimentu je roven jedné a počet bloku, ve kterém jsou ovlivňující faktory, je také roven jedné. Pro zjednodušení bylo označení nastavení faktorů označeno symboly +, - a 0. Nastavení, které se ukrývá pod těmito symboly je vysvětleno v tabulce 9.

Tab 11) Plán plně faktorové zkoušky

Číslo měření	Průběh měření	Blok	Faktory		
			A	B	C
1	1	1	+	+	-
2	2	1	+	+	+
3	3	1	+	-	-
4	4	1	+	-	+
5	5	1	0	+	-
6	6	1	0	+	+
7	7	1	0	-	-
8	8	1	0	-	+
9	9	1	-	+	-
10	10	1	-	+	+
11	11	1	-	-	-
12	12	1	-	-	+

## 6.2 Postup měření

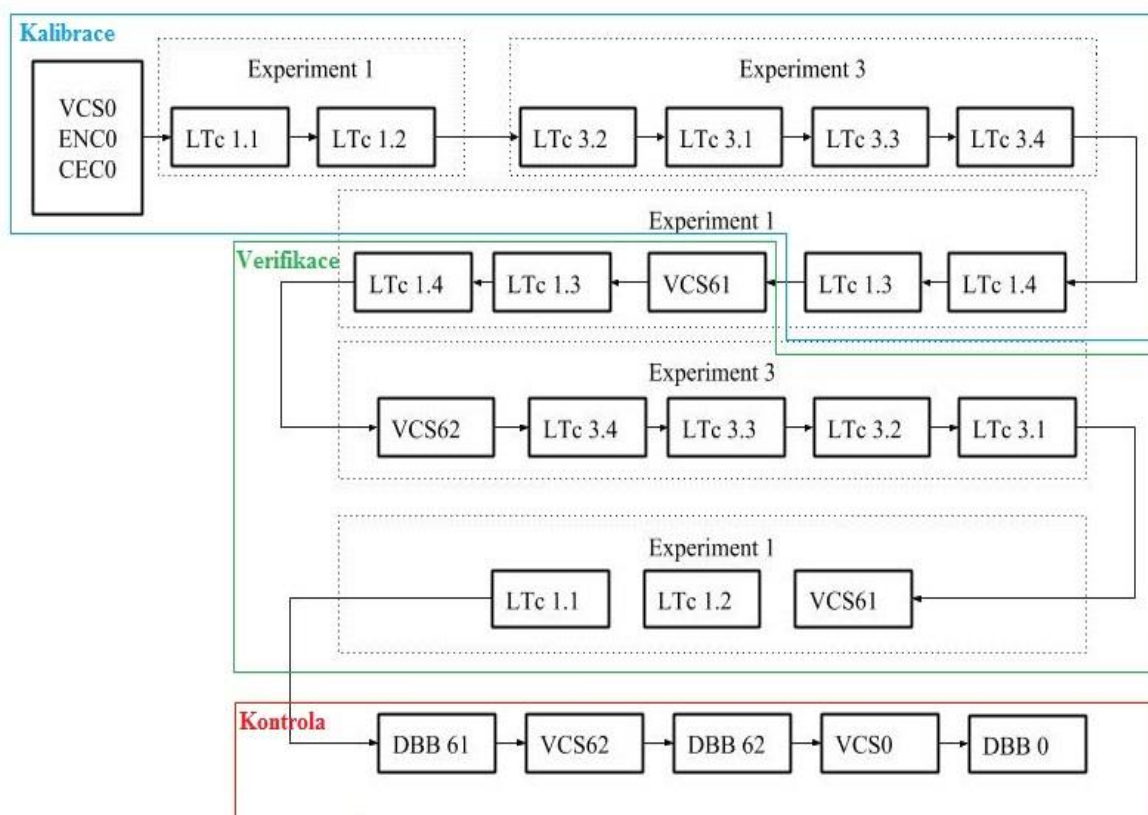
Postup měření je uveden na obrázku 38. Na začátku samotného měření se provede kontrola stroje, u kterého se kontroluje, zda je stroj kompletně smontován a plně funkční. Po této kontrole se stroj zapne a očistí od nečistot, zejména pracovní stůl od špon, které vznikly dřívějším frézováním. Když je stroj očištěný, zapne se program na zahřátí stroje (postup zapnutí/vypnutí a zahřátí stroje bude uveden v kapitole 6.3). Po dostatečném zahřátí stroje na provozní teplotu, následuje samotné měření, které se provádí na nezatíženém stroji, což znamená bez obrobku. Po dokončení měření se stroj vypne.



Obr. 38 Schéma postupu měření

Postup samotného měření je uveden na obrázku 39. Je rozdělen na kalibrační, verifikační a kontrolní měření. Kalibrační a verifikační měření se provádí pomocí LaserTRACERU a kontrolní měření pomocí ballbaru.

Během jednoho dne jsou změřeny vždy dvě měření (plán experimentu byl probrán v kapitole 6.1). Měření dvou prostorů umožňuje stejný NC kód, který je závislý na velikosti prostoru a počtu měřených bodů. Tyto prostory mají stejný prostor a počet měřených bodů. Jediný rozdíl mezi těmito měřeními je rozdílná stabilita laseru. Takto navržený postup měření umožňuje zkrácení doby měření v řádech hodin.



Obr. 39 Schéma samotného měření

Pro pochopení schématu slouží následující vysvětlení: Na začátku měření se musí vypnout všechny kompenzace a to VCS (volumetric compensation), ENC (encoder compensation) a CEC (cross error compensation). Nula znamená, že jsou kompenzace na stroji vypnuté a lze začít se samotným měřením. Po vypnutí kompenzací následuje kalibrační měření, které slouží k vytvoření kompenzačních tabulek. Označení LTc 1.2 znamená, že se měří přístrojem LaserTRACEREM měření číslo 1 a pozice LaserTRACERU je 2. Jednoduše řečeno, číslo před tečkou je číslo měření a za tečkou je pozice LaserTRACERU. V této části se nesmí zapomenout na měnění stability laseru podle čísla měření. V další části se provádí verifikační měření. Zde probíhá postup měření skoro stejně, jako u kalibračního měření, jen v obráceném směru a se zapnutými volumetrickými kompenzacemi. V tomto kroku se nesmí zapomenout na střídání stability laseru a na střídání volumetrických kompenzací. Poslední krok je tzv. kontrolní měření, které slouží k ověření funkčnosti nasazených kompenzačních tabulek. Ke kontrolnímu měření byl použit přístroj ballbaru, který změří kruhovitost s příslušnými kompenzacemi a bez kompenzace.

### **6.3 Postup práce s MCV 754 QUICK**

Kromě zapnutí/vypnutí a zahřátí stroje je zapotřebí tento stroj propojit s LaserTRACEREM a nastavit stroj podle probíhaného měření.

#### **Zahřátí**

Pro zahřátí stroje se používá již předem vygenerovaný NC kód, který nalezneme v paměti řídicího systému. Na ovládacím panelu zmáčkneme program manager. V program manageru najdeme příslušný program pro zahřátí stroje a načteme ho pomocí tlačítka execute. Poté se nastaví pohony na 100 % rychlost a zmáčkne se start. Zahřívací program běží zhruba 30 minut.

#### **Propojení s LaserTRACEREM**

Propojit LaserTRACER s MCV 754 QUICK lze 3 způsoby:

1. Tzv. offline režim – zde je doba měření daného bodu pevně daná.
2. Triggerování – rozjíždění a zastavování stroje se řídí pomocí signálu od měřicího přístroje.
3. On the fly – elektronika zabudovaná v LaserTRACERU je obousměrně propojena s řídicí jednotkou a data o poloze porovnává s průběhem interferometrického měření.

V našem případě jsme použili metodu triggerování, kde je LaserTRACER propojen pomocí kabelu přes dvě vstupní svorky do řídicího systému stroje.

#### **Nastavení kompenzací**

Na začátku měření se musí zkontrolovat, zda jsou kompenzace VCS, ENC A CEC vypnuté. Ke kontrole slouží diagnostika osy (obr. 40), kde u compensation sag+temperature (kompenzace průhybu + teploty) musí být zobrazeno 0.000 mm. Pokud tato kolonka zobrazuje jinou hodnotu než 0.000, musí se vypnout zapnuté kompenzace. Po vypnutí všech kompenzací je nutné zkontrolovat, jestli jsou tyto kompenzace vypnuté pro všechny tři osy. K tomu slouží v diagnostice osy tlačítko axis+ nebo axis-, kde se proklikáme všemi třemi osami a zkontrolujeme, zda v řádku kompenzace průhybu + teplota zobrazuje 0.000 mm.

Načtení a aktivace volumetrické kompenzace je popsáno v kapitole 3.3.

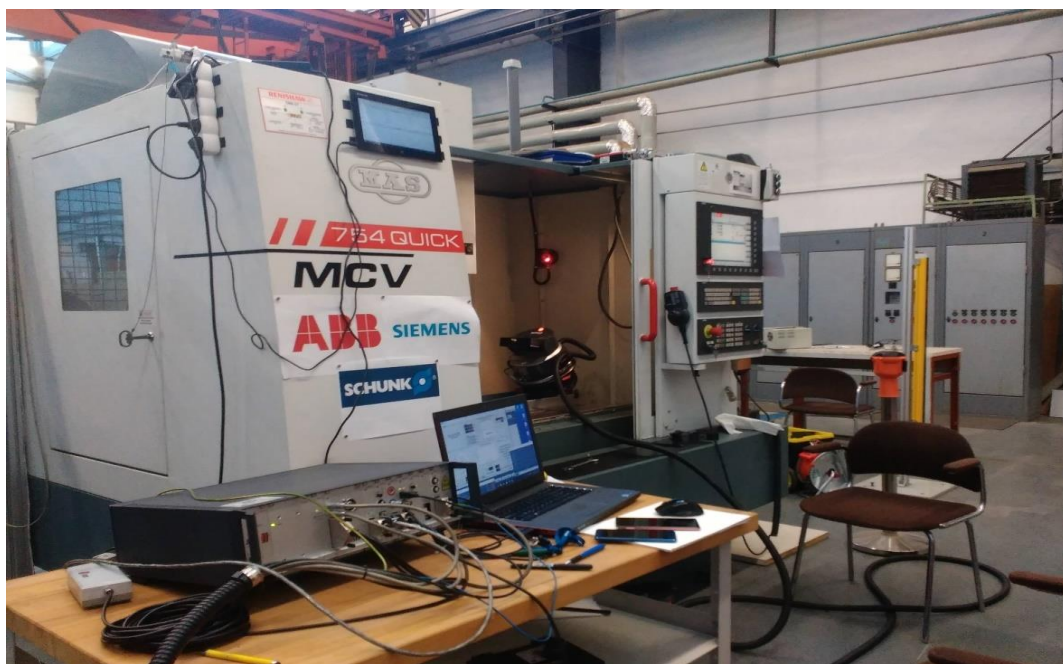
		75131	1 50	<no text available>
Service axis/spindle AX3:2M1 DP3.SLAVE3:2M1_3.3:4 (4)				
Signal		Value	Unit	Axis +
Following error		0.000	mm	
Controller error		0.000	mm	Axis -
Contour deviation (axially)		0.000	mm	
Servo gain factor (calculated)		0.000	1000/min	Select axis
Active measuring system		2		
Pos.actual value measuring system1		-398.169	mm	
Pos.actual value measuring system2		-398.177	mm	
Position setpoint		-398.177	mm	
Abs. compens. value meas. system 1		0.000	mm	
Abs. compens. value meas. system 2		0.000	mm	
Compensation sag + temperature		0.000	mm	
Act.speed value of active encoders		0.001	%	
Setpoint speed of drive		0.000	%	
Pos. offset to master axis/spindle act. value		0.000	mm	
Pos. offset to master axis/spindle setpoint		0.000	mm	
Override		30.000	%	
Parameter set (axis)		1		
Controller mode		Pos. control		
Feed forward control mode		Velocity		
Status "Referenced"		Curr. meas. system ref'd		
Bus TCP/IP          Axis diag.          Safety          Trace          System utiliz.          Drive system				

Obr. 40 Okno diagnostiky osy

## 6.4 Postup práce s LaserTRACEREM

### Zapojení LaserTRACERU

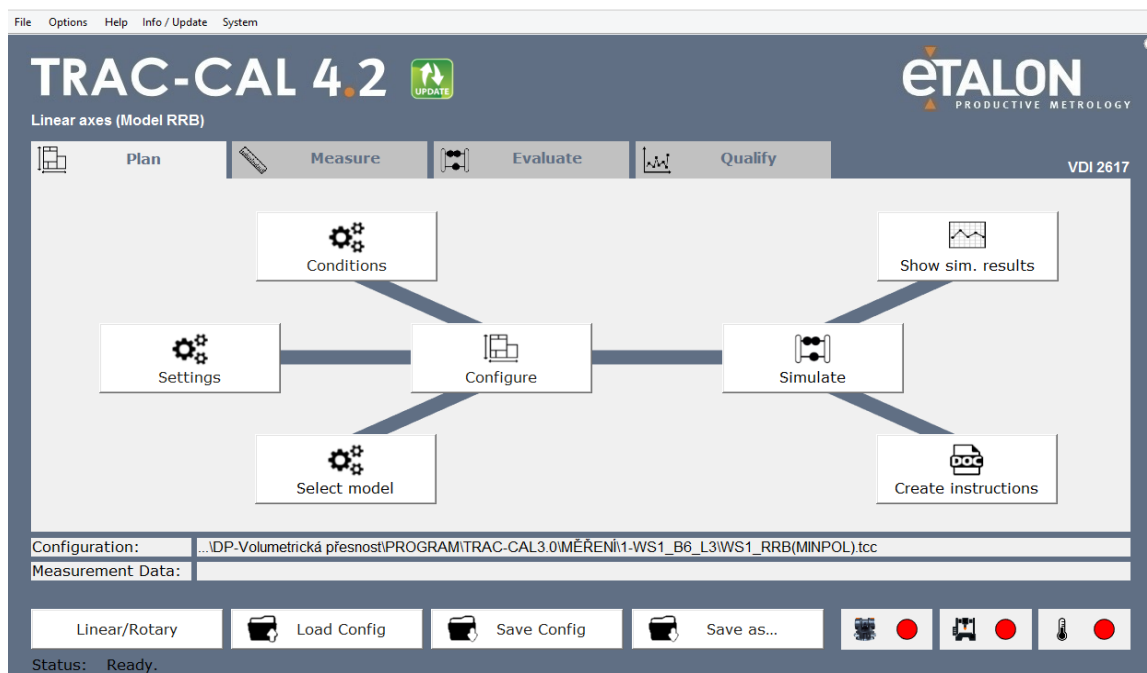
Na obrázku 41 je průběh experimentu, kde jsou znázorněny úplné zapojení všech kabelů. Všechny kabely se zapojují do řídicí jednotky, která obsahuje i externí laser. Tento laser se musí propojit pomocí optických vláken se samotným přístrojem. Do řídicí jednotky se zapojuje napájecí kabel, kabel, který propojuje MCV 754 QUICK s přístrojem tzv. trigr, poté kabel s ovládačem, pomocí kterého se ovládá LaserTRACER a nakonec kabel, který propojuje toto zařízení s počítačem, ve kterém je nainstalovaný měřicí software TRAC-CAL.



Obr. 41 Průběh měření s LaserTRACEREM

## Program TRAC-CAL

Na začátku se stanoví strategie měření v softwaru TRAC-CAL (obr. 42). Tato strategie se nastaví v záložce plan. Nejprve se v okně setting nastaví kinematika měřeného stroje, rozměry měřeného prostoru s počtem interpolačních bodů na každé ose (v tomto případě se nastaví prostory WS1, WS2 a WS3), typ přístroje, se kterým se měří - LaserTRACER s reflektorem, vhodný pro měření malých strojů s úhlem záběru 160° a nakonec se nastaví korekce teploty, která bude dopisována do kompenzace externě.



Obr. 42 Program TRAC-CAL verze 4.2

V okně conditions se nastaví nejistota pro zvolený měřicí přístroj a chyba pro offset reflektoru. Chyba přístroje byla nastavena na 0,2  $\mu\text{m}$  a chyba offsetu na 4 mm.

V okně select model se nastavil model měření. Pro tento experiment se nastavil model RRB (Reduced rigid body), který se používá nejčastěji pro vertikální frézovací centra, u kterých se nepočítá s rotací nástroje.

V okně configure se na začátku nastavila maximální nejistota měření translačních a úhlových pohybů a kolmosti. Nejistota měření byla zvolena pro translační pohyb 0,4  $\mu\text{m}$ , pro úhlový 1,8  $\mu\text{rad}$  a kolmosti 1,8  $\mu\text{rad}$ . Po nastavení chyb se nastavila pozice umístění LaserTRACERU v pracovním prostoru stroje. Pro model RRB se nastavují 4 pozice. Po nastavení pozic se nastavuje prostor a měřená dráha, kde se upravuje prostor měření, aby se dosáhla co nejmenší nejistota měření. Na obrázku 43, je vyobrazena nejistota měření pro měření č. 1.

V záložce measure a okně generate CNC se vygeneruje NC kód. Pro tento experiment se vygeneroval NC kód pro řídicí systém SINUMERIK 840D sl s typem měření trigger. Takto vytvořený NC kód se přenese pomocí flash disku do stroje.

Uncertainties		
EXX	0.1	$\mu\text{m}$
EYX	0.3	$\mu\text{m}$
EZX	0.2	$\mu\text{m}$
EXY	0.1	$\mu\text{m}$
EYY	0.3	$\mu\text{m}$
EZY	0.2	$\mu\text{m}$
EXZ	0.1	$\mu\text{m}$
EYZ	0.1	$\mu\text{m}$
EZZ	0.4	$\mu\text{m}$
EAX	1.2	$\mu\text{rad}$
EBX	0.3	$\mu\text{rad}$
ECX	0.3	$\mu\text{rad}$
EAY	1.0	$\mu\text{rad}$
EBY	0.3	$\mu\text{rad}$
ECY	---	$\mu\text{rad}$
EAZ	---	$\mu\text{rad}$
EBZ	---	$\mu\text{rad}$
ECZ	---	$\mu\text{rad}$
COY	0.5	$\mu\text{rad}$
BOZ	0.4	$\mu\text{rad}$
A0Z	0.4	$\mu\text{rad}$
EAYZ	---	$\mu\text{rad/m}$
EZYZ	---	$\mu\text{m/m}$
Settings		
Recalculate		
Specific value 94		
<input type="checkbox"/> always update		

Obr. 43 Nejistota měření

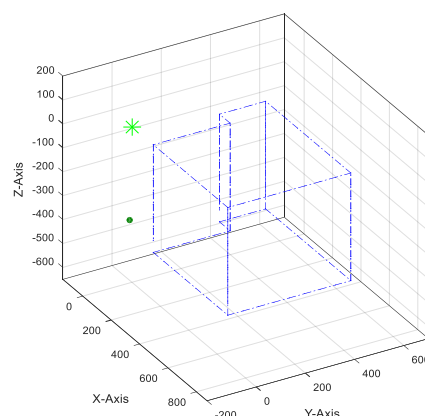


V posledním kroku stačí propojit software TRAC-CAL s měřícím přístrojem pomocí okna connections a začít měřit pomocí okna carry out measurement.

Nakonec se naměřená data v záložce evaluate vyhodnotí. V tomto kroku se nesmí zapomenout dopsat průběh teplot stroje, které byly měřené externě.

### Pozice LaserTRACERU

Pro všechny prostory byly zvoleny stejné pozice umístění LaserTRACERU. Na obrázku 44 a) je zobrazena pozice LaserTRACERU pro měřený prostor WS1 v pozici 1. Na obrázku 44 b) je grafické zobrazení toho samého prostoru a pozice. Zelená tečka je LaserTRACER, zelená hvězdička je umístění reflektoru a modrá je obrys měřeného prostoru s definovanou trajektorií.



Obr. 44 a) Měření WS1 pozice 1, b) Grafické znázornění.

V tabulce 12 jsou uvedeny všechny 4 pozice LaserTRACERU pro měřené prostory. Z tabulky 12 lze kromě polohy LaserTRACERU vyčíst naklonění a také délka offsetu reflektoru.

Tab 12) Pozice LaserTRACERU pro všechny prostor

No.	Pozice LaserTRACER [mm]			Naklonění [°]	Reflektor offset [mm]		
	X	Y	Z		X	Y	Z
1	-140	70	-480	5	0	0	-122
2	-140	305	-480	5	0	0	-122
3	810	95	-320	30	0	0	-122
4	810	230	-320	20	0	0	-122

## 6.5 Postup práce s Ballbarem QC20-W

### Sestavení

Ballbar QC20-W se dodává v kufříku, ve kterém jsou umístěny všechny potřebné komponenty. Tyto komponenty jsou vypsány v kapitole 3.2.4. Sestavení Ballbaru se dá popsat v těchto bodech:

1. Vložení baterie do ballbaru.
2. Sestavení ballbaru s potřebným nadstavcem (v našem případě byl použit poloměr 150 mm).
3. Kalibrace na Zerodurové desce s naměřenou teplotou.

## Postup měření

Po sestavení ballbaru a jeho následné kalibraci pomocí Zerodurové desky se začíná měřit. Samotný postup měření je popsán v následujících bodech:

1. Upnutí upínače do držáku nástroje na vřetení a následná blokace vřetene.
2. Nastavení stolu do zvolené polohy a umístění magnetického držáku na stůl.
3. Vycentrování magnetického držáku s upínačem na vřetení.
4. Nastavení nulového bodu stroje a načtení NC kódu pro daný test.
5. Umístění ballbaru mezi magnetický držák, který je na pracovním stole stroje a upínače, který je umístěn na vřetení.
6. Spuštění testu v programu Renishaw Ballbar 20.

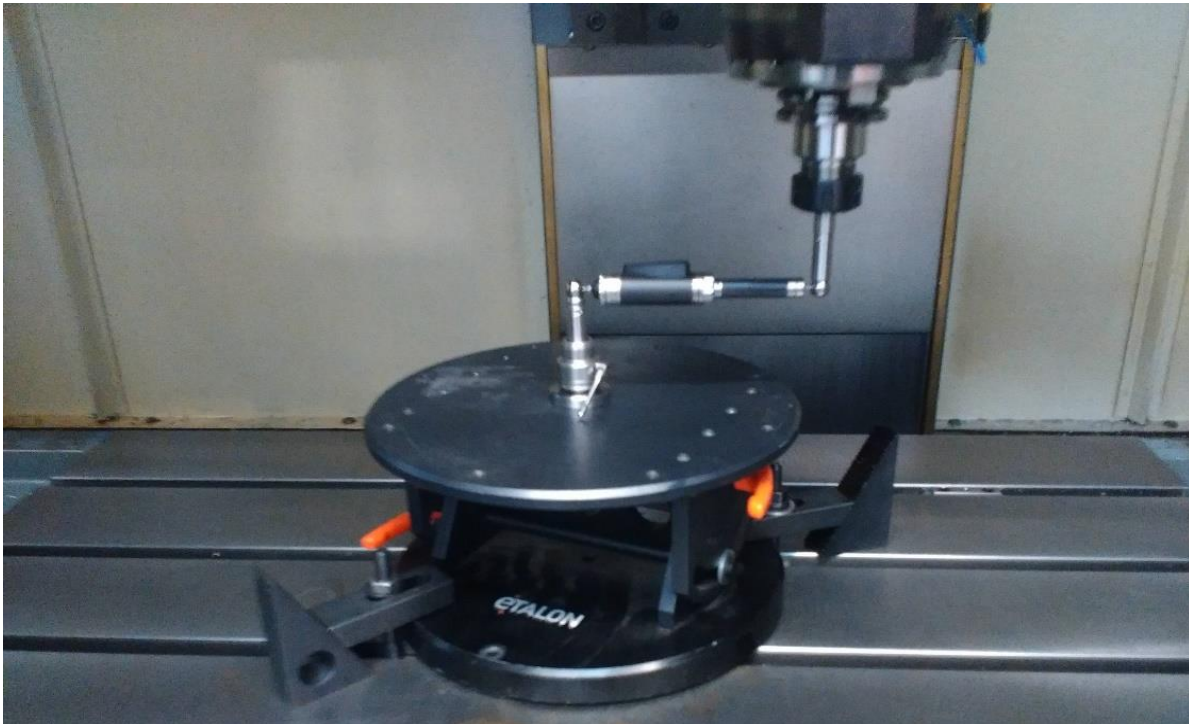
## Program Renishaw Ballbar 20

Na začátku měření se musí nastavit v programu Renishaw Ballbar 20 strategie měření. Tato strategie se nastaví v okně nastavit a spustit test. Nejprve se nastaví formální informace o testovaném stroji, dále se vybere kinematika stroje, rovina testu, posuv, při kterém bude test probíhat (v našem případě je posuv 1000 mm/min), poloměr testu (v našem případě 150 mm). Nakonec se nastaví pro každou rovinu úhel snímání dat, úhel přejezdu a běh měření. Po prvotním nastavení se může spustit test. Měřicí zařízení posílá data do počítače pomocí Bluetooth.

Podrobný popis postupu v programu Renishaw Ballbar 20 je uvedeno v [30].

## Pozice Ballbaru QC20-W

V kapitole 6.1 bylo zmíněno, že měřicí zařízení ballbar se musí vejít do všech třech měřených prostorů. Proto byla zvolena pozice ballbaru (obr. 45) na souřadnice XM1 382, YM1 211 a ZM1 -306,5. Tyto polohy byly nastaveny u všech měření, aby se zaručila opakovatelnost a reprodukovatelnost měření.



Obr. 45 Pozice Ballbaru QC20-W



## 6.6 Výsledky experimentu

Jednotlivé výsledky z měření jsou doloženy v příloze diplomové práce.

### 6.6.1 Měření č. 1

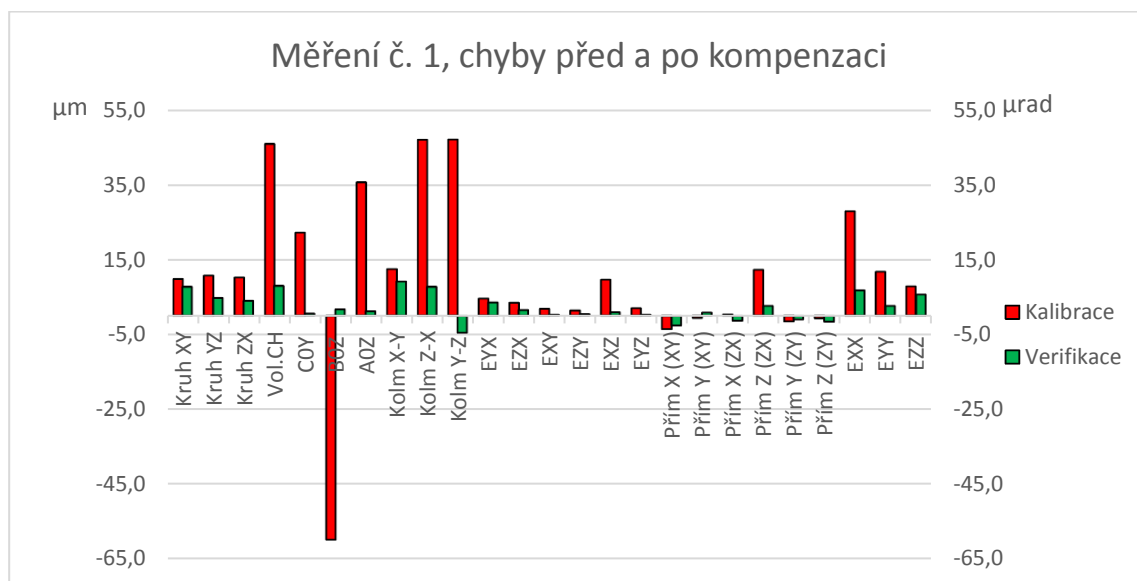
Měření č. 1 se uskutečnilo 21.2.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS1 se stabilitou laseru 3 nm a s počtem interpolačních bodů 6. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

V tabulce 13 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Zeleně jsou označeny ty hodnoty, které se zlepšily alespoň o 50 % po kompenzaci a naopak červeně jsou označeny hodnoty, které se zhoršily (zde už nezáleží o kolik procent). Světlé modré označené typy chyb jsou změřeny pomocí přístroje LaserTRACER a žlutě označené typy chyb jsou naměřeny pomocí přístroje Ballbar QC20-W. Z tabulky jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU, a pomocí ballbaru, a to až o 58,4  $\mu$ rad. Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 1,1  $\mu$ m.

Na obrázku 46 jsou znázorněny tyto chyby graficky.

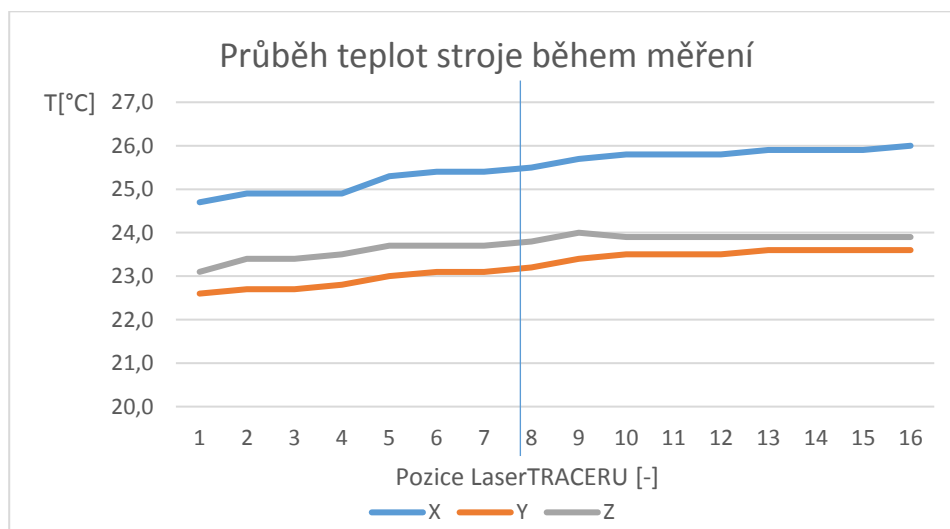
Tab 13) Naměřené hodnoty měření č. 1 před a po kompenzaci

			Kalibrace	Verifikace	Rozdíl	
					Absolutní	Relativní
kruhovitost	Kruhovitost v rovině X-Y	$\mu$ m	9,8	7,8	2,00	20,4 %
	Kruhovitost v rovině Y-Z	$\mu$ m	10,8	4,8	6,00	55,6%
	Kruhovitost v rovině Z-X	$\mu$ m	10,3	4,0	6,30	61,2%
VCS	Volumetrická odchylka	$\mu$ m	46,0	8,0	38,00	82,6%
kolmost	Kolmost v rovině X-Y	$\mu$ rad	22,3	0,6	21,70	97,3%
	Kolmost v rovině Z-X	$\mu$ rad	-60,1	1,7	58,40	97,2%
	Kolmost v rovině Y-Z	$\mu$ rad	35,7	1,2	34,50	96,6%
	Kolmost v rovině X-Y	$\mu$ m/m	12,5	9,2	3,30	26,4%
	Kolmost v rovině Z-X	$\mu$ m/m	47,1	7,8	39,30	83,4%
	Kolmost v rovině Y-Z	$\mu$ m/m	47,2	-4,7	42,50	90,0%
přímost	Odchylka přímosti Y ve směru osy X	$\mu$ m	4,6	3,6	1,00	21,7%
	Odchylka přímosti Z ve směru osy X	$\mu$ m	3,5	1,5	2,00	57,1%
	Odchylka přímosti X ve směru osy Y	$\mu$ m	1,9	0,2	1,70	89,5%
	Odchylka přímosti Z ve směru osy Y	$\mu$ m	1,4	0,4	1,00	71,4%
	Odchylka přímosti X ve směru osy Z	$\mu$ m	9,7	0,9	8,80	90,7%
	Odchylka přímosti Y ve směru osy Z	$\mu$ m	2,0	0,2	1,80	90,0%
	Přímočarost X (Rovina XY)	$\mu$ m	-3,6	-2,7	0,90	25,0%
	Přímočarost Y (Rovina XY)	$\mu$ m	-0,6	0,8	-0,20	-33,3%
	Přímočarost X (Rovina ZX)	$\mu$ m	0,3	-1,4	-1,10	-366,7%
	Přímočarost Z (Rovina ZX)	$\mu$ m	12,3	2,6	9,70	78,9%
	Přímočarost Y (Rovina ZY)	$\mu$ m	-1,6	-1,1	0,50	31,3%
	Přímočarost Z (Rovina ZY)	$\mu$ m	-0,7	-1,7	-1,00	-142,9%
poloha	Přesnost najetí do polohy v ose X	$\mu$ m	28,0	6,8	21,20	75,7%
	Přesnost najetí do polohy v ose Y	$\mu$ m	11,8	2,6	9,20	78,0%
	Přesnost najetí do polohy v ose Z	$\mu$ m	7,9	5,7	2,20	27,8%
čas	Mapování 1 pozice LTC	nn:ss	6:30	6:30		



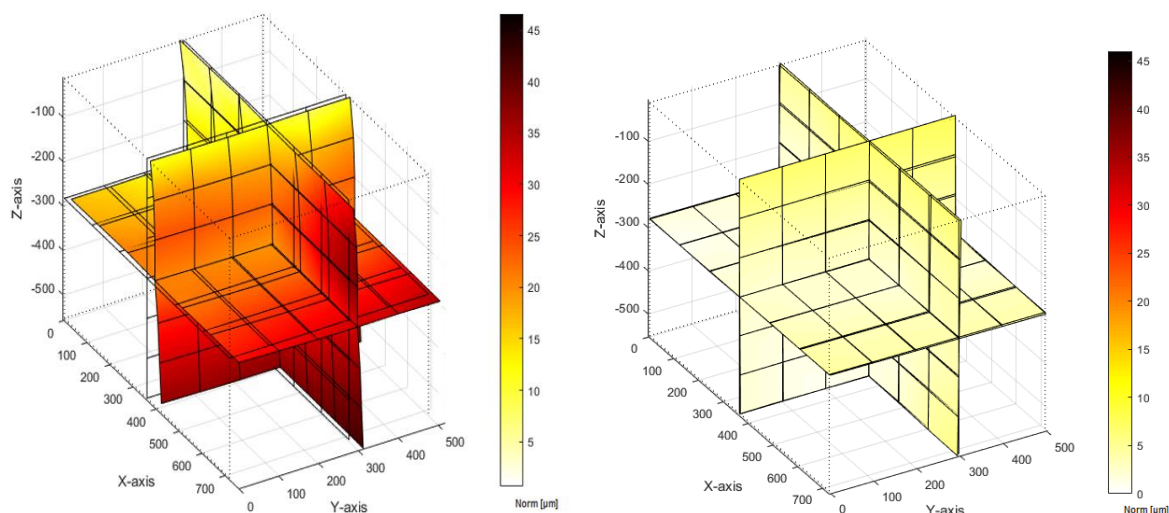
Obr. 46 Graficky zobrazené hodnoty měření č. 1

Na obrázku 47 jsou zobrazeny průběhy teplot os obráběcího stroje. Do bodu 8 jsou teploty zaznamenávány pro kalibrační měření a za tímto bodem teploty pro verifikační měření. Z obrázku je patrné, že při kalibračním měření se stroj trochu zahřívá, naopak u verifikačního měření jsou teploty os ustálené. U verifikačního měření se teploty změnily o 0,3 °C. Nejvíce zahřátá osa stroje byla osa X (26,0 °C).



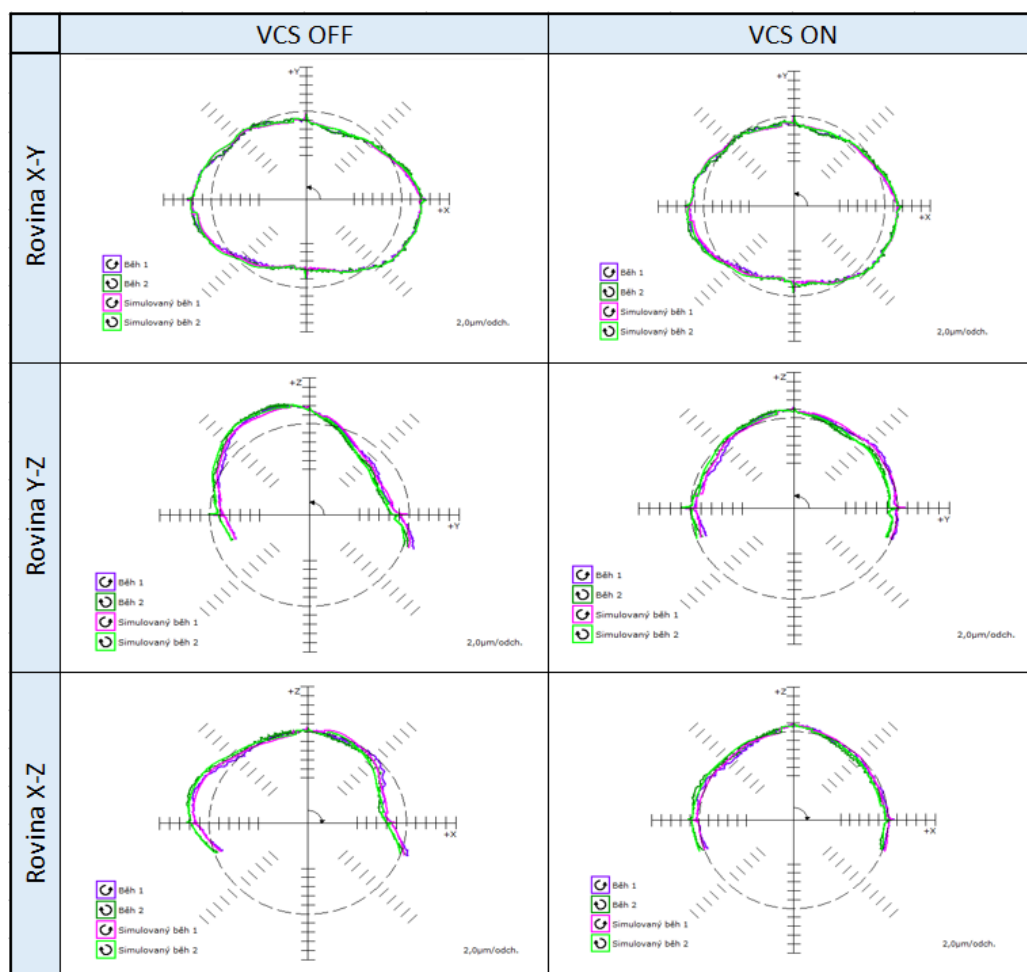
Obr. 47 Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 1

Software TRAC-CAL umožňuje vykreslit základní zobrazení volumetrických odchylek v kontrolovaném prostoru. Toto zobrazení je na obrázku 48. V levé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při kalibračním měření, tedy v původním stavu stroje bez zapnutých kompenzací. Výsledná volumetrická chyba je 48,0 μm. V pravé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při verifikačním měření, tedy ve stavu stroje, kdy má aktivovanou volumetrickou kompenzaci. Výsledná volumetrická chyba je 8,0 μm. Z obrázků 48a,b je na první pohled patrné, že se volumetrická chyba zmenšila.



Obr. 48 Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 1  
 a) před kompenzací b) po kompenzací

Na obrázku 49 jsou zobrazeny výsledky měření zkoušky kruhové interpolace pomocí zařízení Ballbar QC20-W. Z obrázku 49 je patrné zlepšení ve všech třech rovinách. Například v rovině X-Y se kruhovitost zlepšila z 9,8  $\mu\text{m}$  na 7,8  $\mu\text{m}$ .



Obr. 49 Kontrola geometrické přesnosti, zkouškou kruhové interpolace měření č. 1

### **6.6.2 Měření č. 2**

Měření č. 2 se uskutečnilo 13.2.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS1 se stabilitou laseru 3 nm a s počtem interpolačních bodů 11. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

V příloze 1 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU a pomocí ballbaru, a to až o 56,5  $\mu\text{rad}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 0,5  $\mu\text{m}$ .

Volumetrická odchylka po kompenzaci vyšla 8,0  $\mu\text{m}$  a v rovině X-Y se kruhovitost zlepšila z 8,9  $\mu\text{m}$  na 3,2  $\mu\text{m}$ .

### **6.6.3 Měření č. 3**

Měření č. 3 se uskutečnilo 21.2.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS1 se stabilitou laseru 5 nm a s počtem interpolačních bodů 6. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

V příloze 2 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU a pomocí ballbaru, a to až o 53,4  $\mu\text{rad}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 1,6  $\mu\text{m}$ .

Volumetrická odchylka po kompenzaci vyšla 9,0  $\mu\text{m}$  a v rovině X-Y se kruhovitost zlepšila z 9,8  $\mu\text{m}$  na 7,5  $\mu\text{m}$ .

### **6.6.4 Měření č. 4**

Měření č. 4 se uskutečnilo 13.2.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS1 se stabilitou laseru 5 nm a s počtem interpolačních bodů 11. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

V příloze 3 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU a pomocí ballbaru, a to až o 63,50  $\mu\text{m}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 3,9  $\mu\text{m}$ .

Volumetrická odchylka po kompenzaci vyšla 8,0  $\mu\text{m}$  a v rovině X-Y se kruhovitost zlepšila z 8,9  $\mu\text{m}$  na 3,9  $\mu\text{m}$ .

### **6.6.5 Měření č. 5**

Měření č. 5 se uskutečnilo 8.3.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS2 se stabilitou laseru 3 nm a s počtem interpolačních bodů 6. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

V příloze 4 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU a pomocí ballbaru a to až o 44,50  $\mu\text{m}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 1,5  $\mu\text{m}$ .

Volumetrická odchylka po kompenzaci vyšla 11,0  $\mu\text{m}$  a v rovině X-Y se kruhovitost zlepšila z 11,2  $\mu\text{m}$  na 6,3  $\mu\text{m}$ .

#### **6.6.6 Měření č. 6**

Měření č. 6 se uskutečnilo 1.4.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS2 se stabilitou laseru 3 nm a s počtem interpolačních bodů 11. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

V příloze 5 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU a pomocí ballbaru a to až o 51,20  $\mu\text{m}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 1,8  $\mu\text{m}$ .

Volumetrická odchylka po kompenzaci vyšla 14,0  $\mu\text{m}$  a v rovině X-Y se kruhovitost zlepšila z 10,7  $\mu\text{m}$  na 5,0  $\mu\text{m}$ .

#### **6.6.7 Měření č. 7**

Měření č. 7 se uskutečnilo 8.3.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS2 se stabilitou laseru 5 nm a s počtem interpolačních bodů 6. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

V příloze 6 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU a pomocí ballbaru a to až o 42,8  $\mu\text{m}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení o až 1,6  $\mu\text{m}$ .

Volumetrická odchylka po kompenzaci vyšla 11,0  $\mu\text{m}$  a v rovině X-Y se kruhovitost zlepšila z 11,2  $\mu\text{m}$  na 8,0  $\mu\text{m}$ .

#### **6.6.8 Měření č. 8**

Měření č. 8 se uskutečnilo 1.4.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS2 se stabilitou laseru 5 nm a s počtem interpolačních bodů 11. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

V příloze 7 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU a pomocí ballbaru a to až o 53,10  $\mu\text{m}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 1,8  $\mu\text{m}$ .

Volumetrická odchylka po kompenzaci vyšla 10,0  $\mu\text{m}$  a v rovině X-Y se kruhovitost zlepšila z 10,7  $\mu\text{m}$  na 6,3  $\mu\text{m}$ .

#### **6.6.9 Měření č. 9**

Měření č. 9 se uskutečnilo 4.3.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS3 se stabilitou laseru 3 nm a s počtem interpolačních bodů 6. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

V příloze 8 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily určité chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU a pomocí ballbaru a to až o 55,5  $\mu\text{m}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 2,6  $\mu\text{m}$ .

Volumetrická odchylka po kompenzaci vyšla 13,0  $\mu\text{m}$  a v rovině X-Y se kruhovitost zlepšila z 10,2  $\mu\text{m}$  na 9,8  $\mu\text{m}$ .

#### **6.6.10 Měření č. 10**

Měření č. 10 se uskutečnilo 28.2.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS3 se stabilitou laseru 3 nm a s počtem interpolačních bodů 11. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

V příloze 9 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU a pomocí ballbaru a to až o 44,0  $\mu\text{m}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 2,8  $\mu\text{m}$ .

Volumetrická odchylka po kompenzaci vyšla 12,0  $\mu\text{m}$  a v rovině X-Y se kruhovitost zlepšila z 10,7  $\mu\text{m}$  na 5,6  $\mu\text{m}$ .

#### **6.6.11 Měření č. 11**

Měření č. 11 se uskutečnilo 4.3.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS3 se stabilitou laseru 5 nm a s počtem interpolačních bodů 6. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

V příloze 10 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí ballbaru a to až o 49,1  $\mu\text{m}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 1,8  $\mu\text{m}$ .

Volumetrická odchylka po kompenzaci vyšla 18,0  $\mu\text{m}$  a v rovině X-Y se kruhovitost zlepšila z 10,0  $\mu\text{m}$  na 8,5  $\mu\text{m}$ .

#### **6.6.12 Měření č. 12**

Měření č. 12 se uskutečnilo 25.3.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS3 se stabilitou laseru 5 nm a s počtem interpolačních bodů 11. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

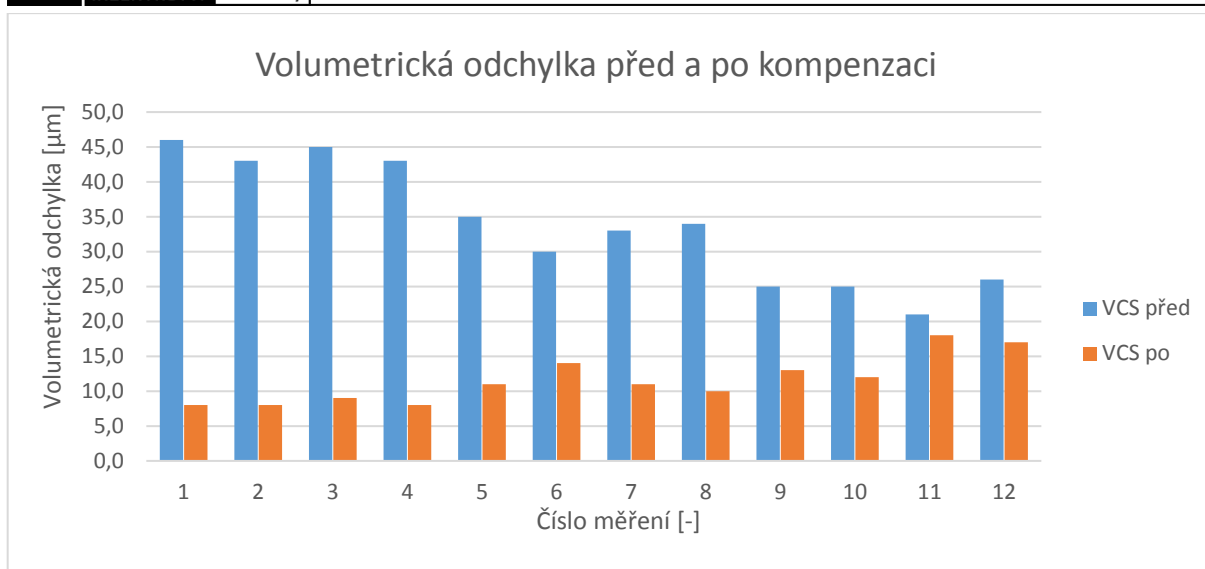
V příloze 11 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU a pomocí ballbaru a to až o 44,2  $\mu\text{m}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 5,9  $\mu\text{m}$ .

Volumetrická odchylka po kompenzaci vyšla 17,0  $\mu\text{m}$  a v rovině X-Y se kruhovitost zlepšila z 10,7  $\mu\text{m}$  na 8,3  $\mu\text{m}$ .

#### **6.6.13 Shrnutí měření**

Z naměřených dat, které jsou uvedeny v kapitole 6 a v přílohách, je patrné, že se u všech měření zlepšily skoro všechny sledované veličiny. Celkově se nejvíce zlepšilo měření číslo 1 a 2. Nejméně se zlepšilo měření číslo 12. V měření číslo 12 vyšla volumetrická chyba po kompenzaci skoro nejméně zlepšená a také se u tohoto měření zhoršily nejvíce odchylky od přímosti a přesnosti najetí do polohy.

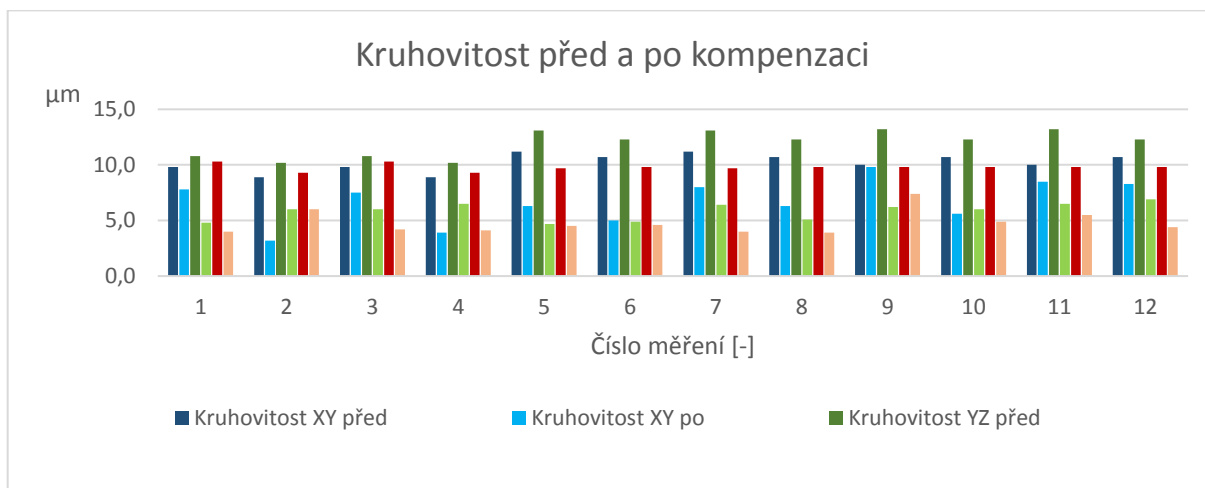
Na obrázku 50 je graf volumetrické odchylky před a po kompenzaci. Z grafu je patrné, že největší volumetrickou odchylku před kompenzací má největší zkoumaný prostor (WS1) a naopak nejmenší volumetrickou chybu má nejmenší prostor (WS3), což se dalo předpokládat. Naopak po kompenzaci má největší prostor nejmenší volumetrickou chybu (průměrná odchylka tohoto prostoru je 8,3  $\mu\text{m}$ ) a nejmenší prostor má tuto odchylku největší (průměrná odchylka tohoto prostoru je 15,0  $\mu\text{m}$ ). Z tohoto průběhu lze předpokládat, že volumetrická chyba je závislá na zkoumaném prostoru. Čím je zkoumaný prostor větší, tím vychází volumetrická odchylka menší. Tyto předpoklady platí pouze pro malé obráběcí stroje.



Obr. 50 Sloupcový graf volumetrické kompenzace před a po kompenzaci

Na obrázku 51 je graf kruhovitosti před a po kompenzaci. Z obrázku je patrné, že se všechny kruhovitosti v příslušných rovinách zlepšily. Nejvíce se zlepšila kruhovitosť v rovině YZ v měření číslo 5, a to o 8,4 μm a naopak nejméně se zlepšila kruhovitosť v rovině XZ v měření číslo 9, a to o 0,2 μm.

Průměrné zlepšení kruhovitosti v rovině XY bylo 3,5 μm, v rovině YZ 6,2 μm a v rovině ZX 5,0 μm. Důvodem nejmenšího průměrného zlepšení, které nastalo v rovině XY, může být dán také způsob měření, jelikož se v této rovině měřila celá kruhovitosť (360°). Ve zbylých dvou rovinách se měřila kruhovitosť jenom 220°.



Obr. 51 Sloupcový graf kruhovitosti v příslušných rovinách před a po kompenzaci





## 7 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ DAT

Všechny statistické vyhodnocení dat pro účel této diplomové práce bylo provedeno v softwaru Minitab, verze 17.

### 7.1 Vyhodnocení plánovaného experimentu

Prvotní vyhodnocení plánovaného experimentu, bez odstranění nevýznamných faktorů a interakci mezi nimi, je prezentováno na obrázku 52. Tento model popisuje z 98,29 % chování volumetrické chyby závislé na zkoumaných faktorech, což uvádí koeficient determinace R-sq. Z obrázku lze také vyčíst jeden významný faktor, kterým je zkoumaný prostor a tvar regresní rovnice pro VCS.

#### Obecná faktorová regrese: VCS mezi Prostorem; Stabilitou laseru; počtem interpolačních bodů

##### Informace o faktorech

Faktor	Úroveň	Hodnota
Prostor	3	ws1; ws2; ws3
Laser	2	3; 5
Body	2	6; 11

##### Analýza variace

Prediktory	DF	Adj SS	Adj MS	F-Hodnota	P-Hodnota
Model	9	124,750	13,8611	12,79	0,075
Lineární	4	95,333	23,8333	22,00	0,044
Prostor	2	91,167	45,5833	42,08	0,023
Laser	1	4,083	4,0833	3,77	0,192
Body	1	0,083	0,0833	0,08	0,808
Interakce druhého řádu	5	29,417	5,8833	5,43	0,163
Prostor*Laser	2	25,167	12,5833	11,62	0,079
Prostor*Body	2	2,167	1,0833	1,00	0,500
Laser*Body	1	2,083	2,0833	1,92	0,300
Chyba	2	2,167	1,0833		
Celkem	11	126,917			

##### Souhr modelu

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,04083	98,29%	90,61%	38,54%

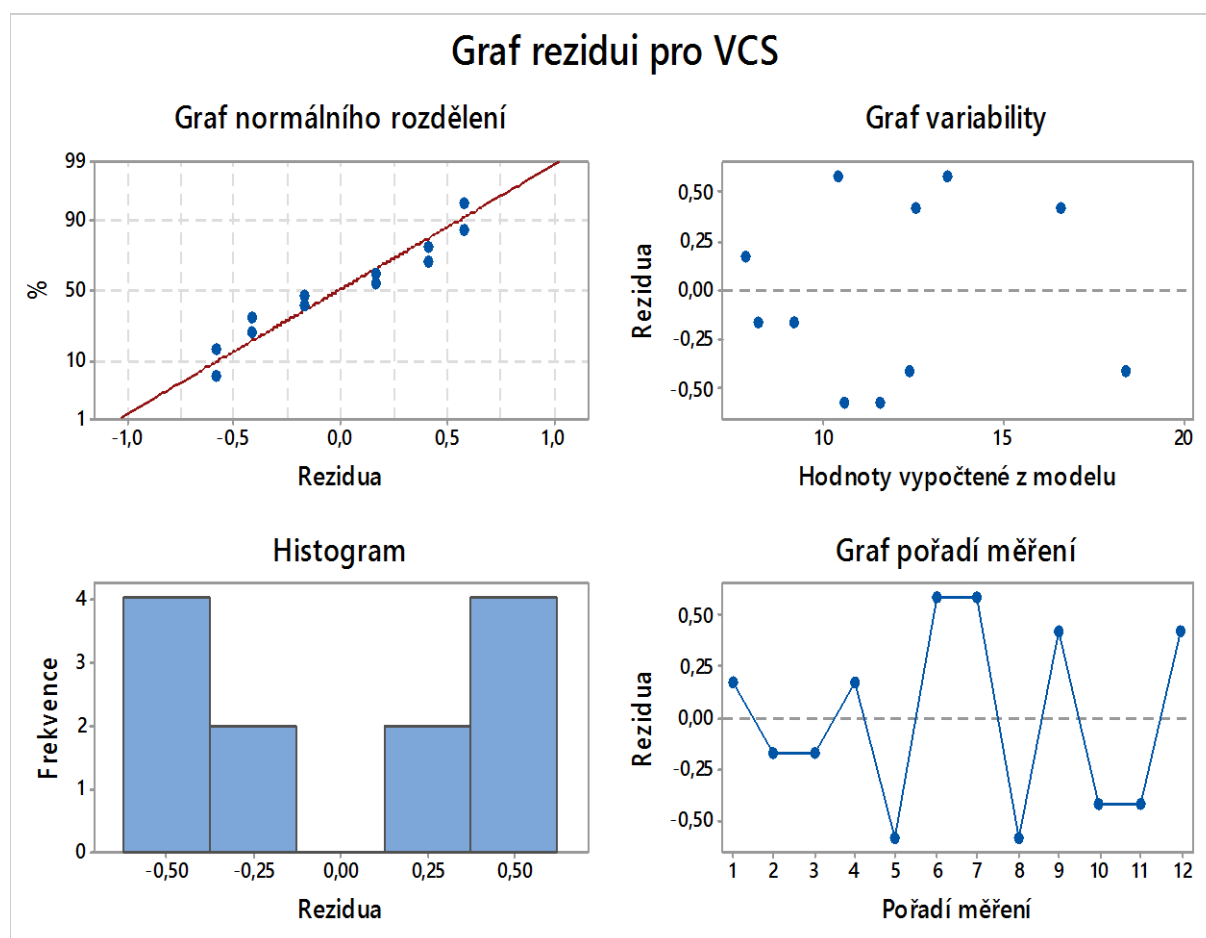
##### Regresní rovnice

VCS = 11,583 - 3,333 Prostor\_ws1 - 0,083 Prostor\_ws2 + 3,417 Prostor\_ws3  
 - 0,583 Laser\_3 + 0,583 Laser\_5 + 0,083 Body\_6 - 0,083 Body\_11  
 + 0,333 Prostor\*Laser\_ws1 3 - 0,333 Prostor\*Laser\_ws1 5  
 + 1,583 Prostor\*Laser\_ws2 3 - 1,583 Prostor\*Laser\_ws2 5  
 - 1,917 Prostor\*Laser\_ws3 3 + 1,917 Prostor\*Laser\_ws3 5 + 0,167 Prostor\*Body\_ws1  
 6 - 0,167 Prostor\*Body\_ws1 11 - 0,583 Prostor\*Body\_ws2 6  
 + 0,583 Prostor\*Body\_ws2 11 + 0,417 Prostor\*Body\_ws3 6 - 0,417 Prostor\*Body\_ws3  
 11 - 0,417 Laser\*Body\_3 6 + 0,417 Laser\*Body\_3 11 + 0,417 Laser\*Body\_5 6  
 - 0,417 Laser\*Body\_5 11

Obr. 52 Obecná faktorová regrese pro volumetrickou odchylku

Na obrázku 53 je graf rezidui pro model bez úprav (bez odstranění nevýznamných faktorů a interakcí). Z grafu normálního rozdělení vyčteme, že rezidua jsou normálně rozdělena (P-Hodnota byla následně vypočtena a vyšla 0,231), ač to podle histogramu nevypadá. Tento

tvár histogramu je zapříčiněn počtem replikací experimentu. Dále rezidua nevykazují žádnou zvýšenou variabilitu vzhledem k odezvě ani k pořadí měření.



Obr. 53 Grafy rezidui pro volumetrickou odchylku

Vyhodnocení plánovaného experimentu s odstraněnými nevýznamnými faktory a interakcí mezi nimi je na obrázku 54. Jako jediný významný faktor je zkoumaný prostor s interakcí prostoru se stabilitou laseru (P-Hodnota  $<0,05$ ).

Tento model popisuje z 91,66 % chování volumetrické chyby závislé na zkoumaných faktorech, což uvádí koeficient determinace  $R^2$ . Největší části variability přispívá kromě zvoleného modelu také faktor prostor (Adj SS 91,17), což označuje, že tento faktor je nejlivnější vysvětlující proměna.

Hodnota VIF u koeficientu blízké 1 naznačuje, že zkoumané faktory nejsou korelované a odhady koeficientů jsou stabilní (robustní vůči menším změnám).

Hledanou závislost volumetrické chyby na faktorech popisuje regresní rovnice. U koeficientu si lze všimnout, že faktor prostoru je srovnáván s prostorem WS3 a k tomuto prostoru je významný jen faktor WS1. Naopak u koeficientu s interakcemi se srovnává prostor WS3 a stabilita laseru 5 s ostatními. Zde je významná změna jen s prostorem WS2 a stabilitou laseru 3.

## Obecná faktorová regrese: VCS mezi Prostorem a stabilitou laseru

Informace o faktorech

Faktor	Úroveň	Hodnota
Prostor	3	ws1; ws2; ws3
Laser	2	3; 5

Analýza variace

Prediktory	DF	Adj SS	Adj MS	F-Hodnota	P-Hodnota
Model	4	116,33	29,083	19,24	0,001
Linear	2	91,17	45,583	30,15	0,000
Prostor	2	91,17	45,583	30,15	0,000
Interakce druhého řádu	2	25,17	12,583	8,32	0,014
Prostor*Laser	2	25,17	12,583	8,32	0,014
Chyba	7	10,58	1,512		
Celkem	11	126,92			

Souhrn modelu

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,22960	91,66%	86,90%	75,49%

Koeficienty

Název	Koef.	SE Koef	T-Hodnota	P-Hodnota	VIF
Konstanta	11,583	0,355	32,63	0,000	
Prostor					
ws1	-3,333	0,502	-6,64	0,000	1,33
ws2	-0,083	0,502	-0,17	0,873	1,33
Prostor*Laser					
ws1 3	0,333	0,502	0,66	0,528	1,33
ws2 3	1,583	0,502	3,15	0,016	1,33

Regresní rovnice

$$\begin{aligned} \text{VCS} = & 11,583 - 3,333 \text{ Prostor\_ws1} - 0,083 \text{ Prostor\_ws2} + 3,417 \text{ Prostor\_ws3} \\ & + 0,333 \text{ Prostor*Laser\_ws1 3} - 0,333 \text{ Prostor*Laser\_ws1 5} \\ & + 1,583 \text{ Prostor*Laser\_ws2 3} - 1,583 \text{ Prostor*Laser\_ws2 5} \\ & - 1,917 \text{ Prostor*Laser\_ws3 3} + 1,917 \text{ Prostor*Laser\_ws3 5} \end{aligned}$$

Obr. 14 Obecná faktorová regrese pro volumetrickou odchylku

Pro ověření výsledku byla provedena ještě regresní analýza, která je zobrazena na obrázku 55. Tento model popisuje z 82,99 % chování volumetrické chyby závislé na zkoumaných faktorech, což uvádí koeficient determinace R-sq. Postupná metoda vyřazování a přidávání členů do modelu byla provedena pomocí funkce Stepwise, která vybírá nejvhodnější kombinaci členů modelu.

Regresní rovnice vyšla jako jediná významná, což naznačuje, že ze zbylých tří členů je alespoň jeden koeficient nenulový.

Když porovnáme obě metody, a to obecnou faktorovou regresi a regresní analýzu, můžeme vidět velmi podobné výsledky a to takové, že volumetrickou chybu nejvíc ovlivňuje

samotný faktor zkoumaného prostoru a interakce tohoto prostoru se stabilitou laseru. (viz obr. 56)

### Regresní analýza: VCS závislé na prostoru, stabilitě laseru a počtu interpolačních bodů

#### Analýza variace

Prediktory	DF	Adj SS	Adj MS	F-Hodnota	P-Hodnota
Represe	3	105,333	35,1111	13,01	0,002
Prostor	1	0,596	0,5956	0,22	0,651
Laser	1	4,762	4,7619	1,77	0,221
Prostor*Laser	1	10,125	10,1250	3,75	0,089
Chyba	8	21,583	2,6979		
Celkem	11	126,917			

#### Souhrn modelu

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,64253	82,99%	76,62%	67,80%

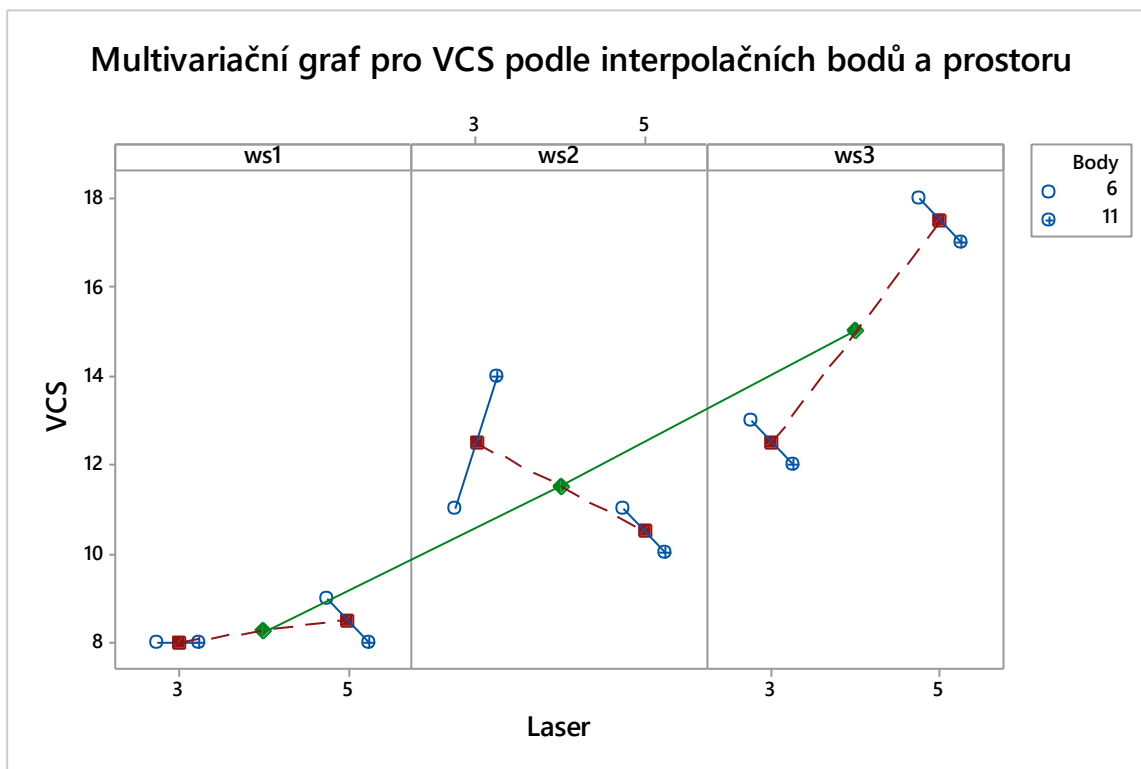
#### Koeficienty

Název	Koef.	SE Koef.	T-Hodnota	P-Hodnota	VIF
Konstant	11,50	5,17	2,22	0,057	
Prostor	-1,13	2,39	-0,47	0,651	17,00
Laser	-1,67	1,25	-1,33	0,221	7,00
Prostor*Laser	1,125	0,581	1,94	0,089	23,00

#### Regresní rovnice

VCS. = 11,50 - 1,13 Prostor - 1,67 Laser + 1,125 Prostor\*Laser

Obr. 55 Regresní analýza volumetrické odchylky



Obr. 56 Multivariační graf pro volumetrickou odchylku

## 7.2 Regresní analýza pro faktor prostoru

Po předchozí analýze a zjištění, že faktor prostoru, interakce prostoru a stabilita laseru jsou významné, byla provedena regresní analýza pro faktor prostoru v závislosti na volumetrické chybě.

Na obrázku 57 je sekvenční analýza variace, ze které vychází, že lineární model (P-Hodnota <0,001) se zdá být dobrou aproximací zkoumaného prostoru. Lineární model popisuje z 71,80 % chování volumetrické chyby závislé na zkoumaném prostoru, což uvádí koeficient determinace R-sq (obr. 57). Na první pohled se zdá podle obrázku 58, že jsou data okolo regresní křivky systematicky rozmístěny. Regresní rovnici naleznete na obrázku 57 a v grafickém zobrazení na obrázku 58.

### Sekvenční analýza variace

Typ	DF	SS	F	P
Lineární	1	91,1250	25,46	0,001
Kvadratický	1	0,0417	0,01	0,921

### Souhr lineárního modelu

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,89187	71,80%	68,98%	57,89%

### Koeficienty

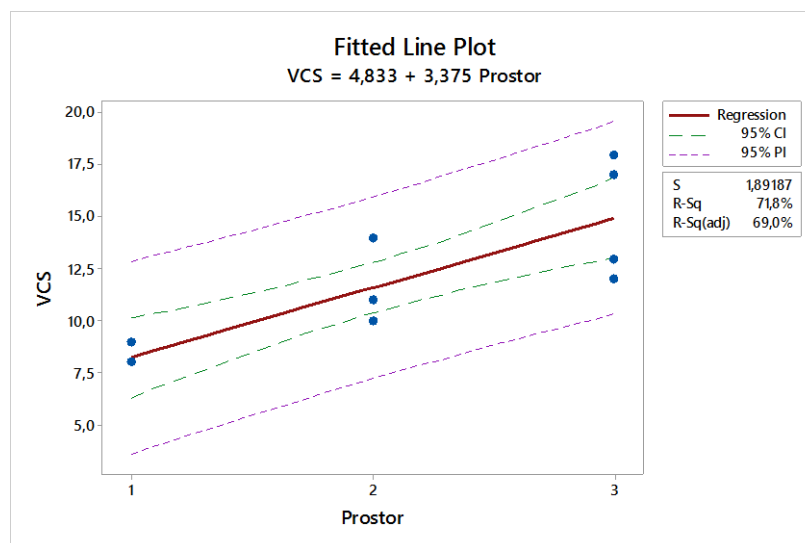
Název	Koef.	SE koef.	T-Hodnota	P-Hodnota	VIF
Konstanta	4,83	1,44	3,35	0,007	
Prostor	3,375	0,669	5,05	0,001	1,00

### Regresní rovnice

$$VCS = 4,83 + 3,375 \text{ Prostor}$$

Obr. 57 Sekvenční analýza variace

Na obrázku 58 si můžeme kromě regresní křivky (červená křivka) povšimnout dvou pásů okolo této regresní křivky. Užší pás (zelená přerušovaná čára) je pás spolehlivosti pro střední



Obr. 58 Graf regresní křivky pro faktor prostoru

hodnotu (čím je užší, tím je lepší odhad) a širší pás (růžová přerušovaná čára) je pás spolehlivosti pro individuální hodnoty. Tento širší pás naznačuje, kde můžeme očekávat další naměřené hodnoty.

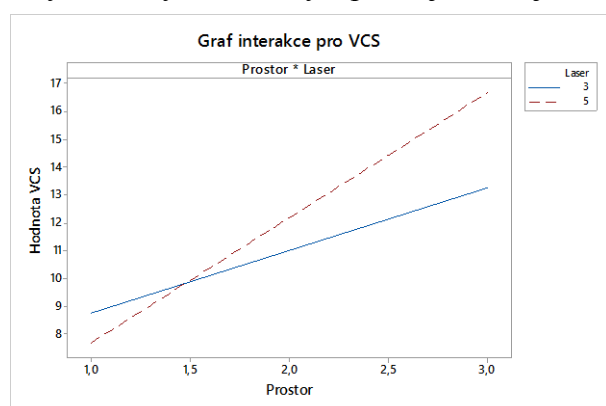
### 7.3 Shrnutí statistického vyhodnocení

Z předešlých výsledků (viz kapitola 7.1 a 7.2) je patrné, že volumetrickou chybu nejvíce ovlivňuje velikost zkoumaného prostoru a poté i interakce tohoto prostoru se stabilitou laseru.

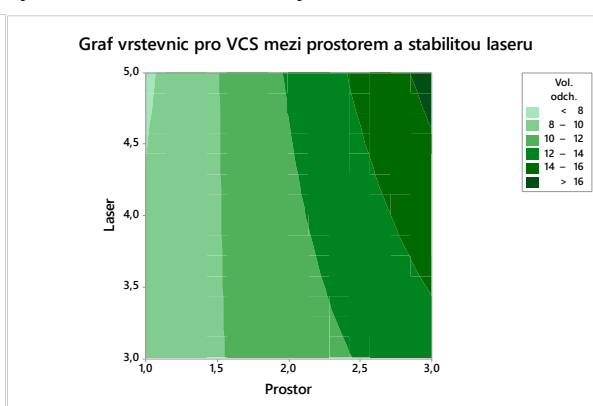
Na obrázku 59 a 60 jsou zobrazeny interakce mezi prostorem a stabilitou laseru. Z obou obrázků je zřetelné, že volumetrické chyby vychází nejlépe, jestliže je zkoumán největší prostor (WS1) se stabilitou laseru 5.

V experimentu se ukázalo, že volumetrická chyba není závislá na počtu interpolačních bodů. Z toho důvodu bych volil jako nejlepší nastavení, pro měření malých obráběcích strojů, největší možný zkoumaný prostor (v našem případě WS1). Faktory stabilita laseru a počet interpolačních bodů jsou statisticky nevýznamné, proto je můžeme nastavit libovolně. Výše zmiňovaná interakce v daném prostoru WS1 fakticky nepůsobí, což je znázorněno na obrázku 56. Pro úsporu času bych tyto faktory nastavil na stabilitu laseru 5 a počet interpolačních bodů 6.

Celkové měření je taky závislé na čase. Záleží už jenom na zákazníkovi, kolik času bude moct investovat do měření volumetrické přesnosti (hlavně na zvolení velikosti zkoumaného prostoru). Zvolený čas sice souvisí se zlepšením přesnosti obráběcího stroje, ale taky souvisí s vynaloženými náklady a prostorem stroje, který v tu dobu nemůže vyrábět.



Obr.59 Graf interakce pro volumetrickou odchylku



Obr. 60 Vrstevnicový graf pro pro volumetrickou odchylku

## 8 DISKUSE

Tímto experimentem bylo prokázáno, že volumetrická odchylka u malých obráběcích strojů je závislá lineárně na velikosti kompenzovaného prostoru a na interakci tohoto prostoru se stabilitou laseru.

Prvotní myšlenka byla, že u nejmenšího zkoumaného prostoru bude po volumetrické kompenzaci dosaženo menší volumetrické odchylky. Na základě získaných dat a provedené analýzy byla tato myšlenka vyvrácena. Výsledky naopak prokázaly, že nejmenší volumetrické odchylky bude dosaženo právě pro největší posuzovaný prostor. Ty výsledky jsou ovšem platné a prokázány pro malý CNC obráběcí stroj (MCV 754 QUICK).

Na základě statistického zpracování naměřených dat lze konstatovat, že náš model sestavený dle plánovaného experimentu popisuje 98 % chování volumetrické odchylky závislé na zkoumaných faktorech. Ze získaných výsledků lze pro další práci, v této oblasti, doporučit místo plně faktorového návrhu s centrálním bodem ve faktoru prostoru (kvůli nepředpokládání lineárního chování) centrálně kompozitní návrh.

Centrálně kompozitní návrh má výhodu v tom, že se v první fázi provede lineární model, který je určen faktorovým návrhem. V tomto kroku se zjistí odhady lineárních efektů a interakcí. Poté se pomocí centrálních bodů určí zakřivení odezvové plochy a pomocí axiálních bodů se zkontrolují kvadratické podmínky. V našem případě nedošlo k žádnému významnému zakřivení plochy, což dokazuje obrázek 56 (zelená čára, která naznačuje průběh změny prostoru, je lineární).

Nevýhodnou kompozitního návrhu je větší nárok na počet měření. Oproti našemu návrhu, kde bylo potřeba 12 měření, by s kompozitním návrhem bylo minimálně 15 měření (plně faktorový plán = 8 měření, 6 měření v axiálních bodech a minimálně 1 měření v centrálním bodu).

V dalším výzkumu a vývoji bych doporučoval ověřit výsledky pro středně velké a velké CNC obráběcí stroje. Dále ověřit vliv velikosti interpolačních kroků v prostoru na výslednou volumetrickou odchylku. V našem experimentu byla velikost interpolačních kroků různá, proto bych v dalším vývoji doporučil nechat prostor WS1 s interpolačním krokem 11 a přidal bych zde prostor s velikostí stran  $X=420$  mm,  $Y=350$  mm a  $Z=315$  mm a interpolačním krokem 8, aby v každé ose byla velikost interpolačního kroků stejná, tedy v  $X=60$  mm,  $Y=50$  mm a  $Z=45$  mm.





## 9 ZÁVĚR

Předkládaná diplomová práce na téma volumetrická přesnost obráběcích strojů byla zaměřena na dosažení šesti dílčích cílů, mezi něž se řadilo zmapování současného stavu používané měřicí techniky, popis zavádění volumetrické kompenzace na řídicí systém Siemens, systémový rozbor problematiky, návrh a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení, naplánování experimentu, statistické zpracování s vyhodnocením výsledků experimentu a vlastní závěry. Pro vypracování praktické části diplomové práce byl použit obráběcí stroj MCV 754 QUICK s měřicím přístrojem LaserTRACER a ballbar QC20-W, který se nachází v prostorách VUT v Brně na fakultě FSI v prostorách UVSSR.

První část práce je věnovaná teoretickému rozboru problému, kde se obecně pojednává o volumetrické kompenzaci a přesnosti obráběcího stroje. V podkapitole 3.2 jsou popsány měřicí přístroje, které se používají pro měření volumetrických a geometrických chyb obráběcího stroje. Jsou zde uvedeny také principy měření s těmito přístroji a porovnány modely přístrojů od konkurenčních firem. Popis zavádění volumetrické kompenzace do řídicího systému Siemens je popsán v kapitole 3.3. Kromě popisu, jak volumetrickou kompenzaci zavést, jsou zde ukázány i kompenzační tabulky s návodem aktivace v řídicím systému SINUMERIK 840. Následující kapitola popisuje rešeršní rozbor plánovaného experimentu. V této kapitole jsou popsány základní principy pro použití plánovaného experimentu a jsou zde popsány také principy klasického a moderního pojetí plánování experimentu.

Druhá část práce je zaměřena na praktickou část. Nejprve byl proveden systémový rozbor problému a návrh. Zvolený způsob řešení lze vidět v kapitole 6. V podkapitole 6.1 byl kromě návrhu a zvoleného způsobu řešení popsán plán experimentu. Byl zvolen plně faktorový plán s centrálním bodem ve faktoru prostoru. Centrální bod byl zvolen v tomto faktoru, jelikož se zde nepředpokládal lineární průběh. V další kapitole byla naměřená data statisticky zpracována a vyhodnocena.

Hlavními přínosy této práce byla zjištění, že velikost zkoumaného prostoru na malých obráběcích strojích se chová lineárně, a že nezáleží na počtu interpolačních bodů. Zjištění, že nezáleží na počtu interpolačních bodů znamená, že se v praxi zkrátí potřebný čas pro měření s přístrojem LaserTRACER. V praxi se běžně používá 10 interpolačních bodů na přímku. V našem experimentu jsme používali počet interpolačních bodů 6 a 11. Tento rozdíl 5 bodů udělal u složitějšího modelu rozdíl i přes sto měřených bodů celkově na jednu pozici LaserTRACERU. Průměrná úspora času s použitím méně interpolačních bodů byla na jednu pozici zhruba 4 minuty. Jelikož se u každého testu provádí osm pozic měření, je celková úspora okolo 30 minut.

Pro ověření výsledků získaných z měření, které byly vyhodnoceny ve stavu bez zatížení stroje, by bylo vhodné v dalším kroku ověřit pracovní přesnost. Jednalo by se o obrábění dvou zkušebních obrobků za dokončovacích podmínek obrábění. První ve stavu bez aktivovaných kompenzací a druhý s nastavenou kompenzací z měření číslo 1 nebo 2, kde byly výsledky nejlepší. Na zkušebním vzorcích by byly kontrolovány chyby rozměru a tvaru.

Dále se prokázalo, že u zkoumaného stroje není vhodné zkrátit čas měření, či zvýšit výslednou přesnost zmenšením kompenzovaného pracovního prostoru, jelikož nejmenší volumetrická odchylka vyšla právě u největšího kompenzovaného prostoru.



## 10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Etalon AG* [online]. Německo [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.etalon-ag.com/>
- [2] MAREK, J., a kol. *Konstrukce CNC obráběcích strojů IV*. 2018. Praha: MM publishing, s.r.o, 2018, 427 stran: barevné ilustrace, fotografie. ISBN 978-80-906310-8-3.
- [3] *Renishaw* [online]. Spojené království, c2001-2019 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz>
- [4] *Siemens Česká republika* [online]. Česká republika, c1996-2019 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://new.siemens.com/cz/cz.html>
- [5] HOLUB, Michal, Josef KNOBLOCH a Jiří PERNIKÁŘ. *GTS - Testování obráběcích strojů*: [Podklady k výuce]. Verze 1.7. Brno: VUT, 2015.
- [6] Pohybový systém - Definice. *ETEL S.A* [online]. Switzerland [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.etel.ch/cz/pohybove-systemy/definice/>
- [7] TALÁCKO, Jaroslav a kol. *Mechatronika*. 2017. Česká republika: Computer Press, Albatros Media, 2017. ISBN 9788025141731.
- [8] Interference světla. *Gymnázium Ladislava Jaroše Holešov* [online]. Holešov [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: [https://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/08\\_interf/08\\_interf.htm](https://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/08_interf/08_interf.htm)
- [9] *Interferometry a vlastnosti laserového záření* [online]. Praha, c2007 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: [http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP\\_03.pdf](http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP_03.pdf)
- [10] Laser Doppler Displacement Meter: MCV-5000. *Optodyne, Inc.* [online]. USA, c2009-2015 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <http://www.optodyne.com/opnew5/products/mvc5000.html>
- [11] LP 30. *Feanor* [online]. Estonia [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: [http://www.feanor.com/LP\\_30.PDF](http://www.feanor.com/LP_30.PDF)
- [12] LS 120: MĚŘENÍ GEOMETRIE LASEROVÝM INTERFEROMETREM. *Limtek Laser Division SAR s.r.o.* [online]. Czech Republic [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <http://www.limteklaser.com/ls120.html>
- [13] 5530 Dynamic Calibrator. *Keysight Technologies* [online]. USA, c2017 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-9712EN.pdf?id=1750511>
- [14] 5530 Laser Calibration System. *Keysight Technologies* [online]. USA, 2008 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-9354EN.pdf?id=1000083864:epsg:dow>
- [15] WANG, Zheng, Luca MASTROGIACOMO, Fiorenzo FRANCESCHINI a Paul MAROPOULOS. Experimental comparison of dynamic tracking performance of iGPS and laser tracker. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. London: Springer-Verlag, 2011, 56(1), 205-213 [cit. 2019-03-23]. DOI: 10.1007/s00170-011-3166-0. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1007/s00170-011-3166-0>
- [16] Laser Trackers – From Inspection to Manufacturing. *ENGINEERING.com | Information & Inspiration for Engineers* [online]. 2016 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/13499/Laser-Trackers-From-Inspection-to-Manufacturing.aspx>
- [17] *Automated Precision: Reverse Engineering* [online]. USA, c2010-2016 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://apisensor.com/>

- [18] *FARO: 3D Measurement* [online]. Florida, c2019 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.faro.com/>
- [19] *Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. Japonsko, c2019 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/>
- [20] BlueSYSTEM SIGMA - the ORIGINAL. WYLER AG, *Inclination Measuring Instruments and Sensors - since 1928* [online]. SWITZERLAND, c2019 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.wylerag.com/en/products/measuring-instruments/bluesystem-sigma-the-original/>
- [21] Machine tool inspection and analyzer solutions. *IBS Precision Engineering* [online]. The Netherlands [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <http://www.ibspe.com/category/machine-tool-inspection-and-analyzer-solutions.htm>
- [22] *AfM Technology GmbH* [online]. Německo, c2007-2017 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <http://www.afm-tec.com/>
- [23] MONTGOMERY, Douglas C. *Design and Analysis of Experiments*. 5th edition. New York: Wiley, 2001. ISBN 0-471-31649-0.
- [24] A Quick History of the Design of Experiments (DOE). *Eberly College of Science* [online]. Pensylvánie, c2018 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://newonlinecourses.science.psu.edu/stat503/node/6/>
- [25] The Basic Principles of DOE. *Eberly College of Science* [online]. Pensylvánie, c2018 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://newonlinecourses.science.psu.edu/stat503/node/67/>
- [26] KOWANG, Tan owee a Choi sang LONG. Design of Experiment – An Integration of Fisher, Taguchi and Shainin DOE Methodology. *Applied Mechanics and Materials* [online]. Trans Tech Publications, 2015, 789(Manufacturing Science and Technology VI), 1201-1206 [cit. 2019-03-23]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.789-790.1201. ISSN 1660-9336. Dostupné z: [https://search.proquest.com/docview/1753514429?rfr\\_id=info%3Axri%2Fsid%3Aprimo](https://search.proquest.com/docview/1753514429?rfr_id=info%3Axri%2Fsid%3Aprimo)
- [27] BLECHA, P. a I. VAVŘÍK. *Jakost II - Řízení a zabezpečování jakosti: Kapitola DoE*. Brno: VUT, 2006.
- [28] BESHARATI-GIVI, M.-K. a P. ASADI. *Advances in Friction-Stir Welding and Processing*. Elsevier Science, 2014. DOI: 10.1016/C2013-0-16268-X. ISBN 0857094548.
- [29] MCV 754 QUICK. *Obráběcí stroje, CNC stroje, CNC soustruhy | KOVOSVIT MAS* [online]. Česká republika, c2016 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/mcv-754-quick-p3.html#technicaldata>
- [30] POKORNÝ, Z. *Zpracování dat z měření na obráběcích strojích*. Brno, 2018, 114 s. Dostupné také z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=173860](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=173860). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.

# 11 SEZNAM ZKRATEK, OBRÁZKŮ A TABULEK

## 11.1 Seznam zkratk

Zkratka	Význam
ADM	Absolute Distance Measurement
API	Automated Precision Inc.
CEC	Cross error compensation
CNC	Computer Numerical Control
ENC	Encoder compensation
FRB	Full Rigid Body
HMI	Hexagon Manufacturing Intelligence
IFM	Interferometer
LTc	LaserTRACER
NC	Numerical control
NPL	National Physical Laboratory
PTB	Physikalisch-Technische-Bundesanstalt
RRB	Reduced rigid body
TCP	Toll Center Point
VCS	Volumetric Compensation Systém

## 11.2 Seznam tabulek

Tab 1)	Geometrické chyby [2].....	20
Tab 2)	Srovnání laserových interferometrů [3] [10] [11] [12] [13] .....	24
Tab 3)	Srovnání Laser Trackerů [17] [18] [19].....	27
Tab 4)	Srovnání LaserTRACERŮ [1] .....	30
Tab 5)	Srovnání ballbarů od firmy Renishaw a API [3] [17].....	31
Tab 6)	Příklad faktorového plánu se sloupcem vzájemného působení [27].....	39
Tab 7)	Srovnání počtu zkoušek mezi plně faktorovým plánem a Taguchiho plánem [28] .	42
Tab 8)	Technické parametry MCV 754 QUICK [29] .....	45
Tab 9)	Seznam hlavních faktorů a jejich nastavení .....	47
Tab 10)	Velikost prostorů.....	47
Tab 11)	Plán plně faktorové zkoušky .....	50
Tab 12)	Pozice LaserTRACERU pro všechny prostor.....	55
Tab 13)	Naměřené hodnoty měření č. 1 před a po kompenzaci .....	57
Tab 14)	Naměřené hodnoty měření č. 2 před a po kompenzaci .....	85
Tab 15)	Naměřené hodnoty měření č. 3 před a po kompenzaci .....	88

Tab 16)	Naměřené hodnoty měření č. 4 před a po kompenzaci.....	91
Tab 17)	Naměřené hodnoty měření č. 5 před a po kompenzaci.....	94
Tab 18)	Naměřené hodnoty měření č. 6 před a po kompenzaci.....	97
Tab 19)	Naměřené hodnoty měření č. 7 před a po kompenzaci.....	100
Tab 20)	Naměřené hodnoty měření č. 8 před a po kompenzaci.....	103
Tab 21)	Naměřené hodnoty měření č. 9 před a po kompenzaci.....	106
Tab 22)	Naměřené hodnoty měření č. 10 před a po kompenzaci.....	109
Tab 23)	Naměřené hodnoty měření č. 11 před a po kompenzaci.....	112
Tab 24)	Naměřené hodnoty měření č. 12 před a po kompenzaci.....	115

### 11.3 Seznam obrázků

Obr. 1)	Princip volumetrické kompenzace [4] .....	19
Obr. 2)	Schéma odchylek třísove kinematiky [1] .....	20
Obr. 3)	Přesnost polohování a opakovatelnosti [6] .....	21
Obr. 4)	Grafické znázornění volumetrické přesnosti [1].....	22
Obr. 5)	Interferenční obrazec [8].....	23
Obr. 6)	Princip Michelsonova interferometru [9] .....	23
Obr. 7)	Laserový interferometr XL-80 s kompenzátozem XC-80 [3].....	24
Obr. 8)	Optické nastavení pro lineární měření [14] .....	25
Obr. 9)	Optické nastavení pro měření natočení na ose Y [14] .....	25
Obr. 10)	Konstrukce Laser Trackeru [16].....	26
Obr. 11)	Schéma Laser Trackeru [5].....	26
Obr. 12)	HMI Leica AT 402 [19].....	26
Obr. 13)	API Radian Pro [17] .....	26
Obr. 14)	FARO Vantage S6 [18] .....	26
Obr. 15)	Průběh vývoje Laser Trackerů od společnosti API [17].....	27
Obr. 16)	LaserTRACER-NG [1] .....	28
Obr. 17)	LaserTRACER-MT [1].....	29
Obr. 18)	Ballbar QC20-W [3] .....	30
Obr. 19)	Ukázka měření systémem ballbar v rovině ZX [3].....	31
Obr. 20)	Měřicí zařízení BlueLevel [20].....	31
Obr. 21)	Princip měření pomocí zařízení BlueLevel [20].....	32
Obr. 22)	Sonda Trinity v praxi [21] .....	32
Obr. 23)	Ovládací panel SINUMERIK 840 [4] .....	33
Obr. 24)	Postup zavádění volumetrické kompenzace do obráběcího stroje [2].....	33
Obr. 25)	Část kompenzační tabulky .....	34
Obr. 26)	Princip aktivace VCS na řídicí jednotce .....	34

Obr. 27) Základní model procesu [24] .....	35
Obr. 28) Příklady klasického plánování zkoušek [27] .....	38
Obr. 29) Typy klasických plánovaného experimentu [27] .....	39
Obr. 30) Srovnání metod plánování experimentu [27] .....	40
Obr. 31) Schéma průběhu plánovaného experimentu podle Shainina [27] .....	41
Obr. 32) Schéma průběhu plánovaného experimentu podle Taguchiho [27] .....	43
Obr. 33) MCV 754 QUICK [29] .....	45
Obr. 34) Zkoumané prostory .....	48
Obr. 35) Výška spodní roviny .....	48
Obr. 36) Hledání proměnných .....	49
Obr. 37) Graf trendu kruhovitosti při vypnutých kompenzacích .....	50
Obr. 38) Schéma postupu měření .....	51
Obr. 39) Schéma samotného měření .....	51
Obr. 40) Okno diagnostiky osy .....	53
Obr. 41) Průběh měření s LaserTRACEREM .....	53
Obr. 42) Program TRAC-CAL verze 4.2 .....	54
Obr. 43) Nejistota měření .....	54
Obr. 44) a) Měření WS1 pozice 1, b) Grafické znázornění .....	55
Obr. 45) Pozice Ballbaru QC20-W .....	56
Obr. 46) Graficky zobrazené hodnoty měření č. 1 .....	58
Obr. 47) Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 1 .....	58
Obr. 48) Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 2 a) před kompenzací b) po kompenzací .....	59
Obr. 49) Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 2 .....	59
Obr. 50) Sloupcový graf volumetrické kompenzace před a po kompenzací .....	63
Obr. 51) Sloupcový graf kruhovitosti v patřičných rovinách před a po kompenzací .....	63
Obr. 52) Obecná faktorová regrese pro volumetrickou odchylku .....	65
Obr. 53) Grafy rezidui pro volumetrickou odchylku .....	66
Obr. 54) Obecná faktorová regrese pro volumetrickou odchylku .....	67
Obr. 55) Regresní analýza volumetrické odchylky .....	68
Obr. 56) Multivariační graf pro volumetrickou odchylku .....	68
Obr. 57) Sekvenční analýza variace .....	69
Obr. 58) Graf regresní křivky pro faktor prostoru .....	69
Obr. 59) Graf interakce pro volumetrickou odchylku .....	70
Obr. 60) Vrstevnicový graf pro volumetrickou odchylku .....	70
Obr. 61) Graficky zobrazené hodnoty měření č. 2 .....	86
Obr. 62) Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 2 .....	86

Obr. 63)	Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 2 a) před kompenzací b) po kompenzací .....	87
Obr. 64)	Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 2 .....	87
Obr. 65)	Graficky zobrazené hodnoty měření č. 3 .....	89
Obr. 66)	Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 3 .....	89
Obr. 67)	Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 3 a) před kompenzací b) po kompenzací .....	90
Obr. 68)	Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 3 .....	90
Obr. 69)	Graficky zobrazené hodnoty měření č. 4 .....	92
Obr. 70)	Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 4 .....	92
Obr. 71)	Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 4 a) před kompenzací b) po kompenzací .....	93
Obr. 72)	Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 4 .....	93
Obr. 73)	Graficky zobrazené hodnoty měření č. 5 .....	95
Obr. 74)	Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 5 .....	95
Obr. 75)	Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 5 a) před kompenzací b) po kompenzací .....	96
Obr. 76)	Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 5 .....	96
Obr. 77)	Graficky zobrazené hodnoty měření č. 6 .....	98
Obr. 78)	Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 6 .....	98
Obr. 79)	Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 6 a) před kompenzací b) po kompenzací .....	99
Obr. 80)	Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 6 .....	99
Obr. 81)	Graficky zobrazené hodnoty měření č. 7 .....	101
Obr. 82)	Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 7 .....	101
Obr. 83)	Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 7 a) před kompenzací b) po kompenzací .....	102
Obr. 84)	Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 7 .....	102
Obr. 85)	Graficky zobrazené hodnoty měření č. 8 .....	104
Obr. 86)	Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 8 .....	104
Obr. 87)	Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 8 a) před kompenzací b) po kompenzací .....	105
Obr. 88)	Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 8 .....	105
Obr. 89)	Graficky zobrazené hodnoty měření č. 9 .....	107
Obr. 90)	Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 9 .....	107
Obr. 91)	Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 9 a) před kompenzací b) po kompenzací .....	108
Obr. 92)	Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 9 .....	108
Obr. 93)	Graficky zobrazené hodnoty měření č. 10 .....	110



Obr. 94)	Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 10 .....	110
Obr. 95)	Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 10 a) před kompenzací b) po kompenzací.....	111
Obr. 96)	Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 10 ..	111
Obr. 97)	Graficky zobrazené hodnoty měření č. 11 .....	113
Obr. 98)	Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 11 .....	113
Obr. 99)	Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 11 a) před kompenzací b) po kompenzací.....	114
Obr. 100)	Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 11 ..	114
Obr. 101)	Graficky zobrazené hodnoty měření č. 12 .....	116
Obr. 102)	Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 12 .....	116
Obr. 103)	Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 12 a) před kompenzací b) po kompenzací.....	117
Obr. 104)	Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 12 ..	117



## 12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Měření č. 2.....	85
Příloha 2: Měření č. 3.....	88
Příloha 3: Měření č. 4.....	91
Příloha 4: Měření č. 5.....	94
Příloha 5: Měření č. 6.....	97
Příloha 6: Měření č. 7.....	100
Příloha 7: Měření č. 8.....	103
Příloha 8: Měření č. 9.....	106
Příloha 9: Měření č. 10.....	109
Příloha 10: Měření č. 11.....	112
Příloha 11: Měření č. 12.....	115



## PŘÍLOHY

### Příloha 1: Měření č. 2

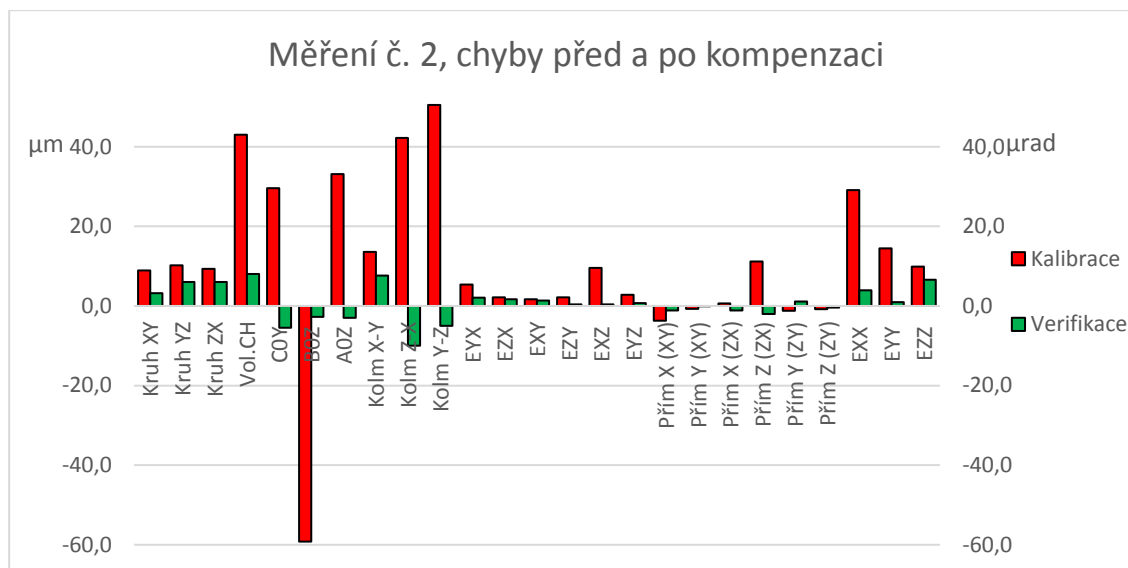
Měření č. 2 se uskutečnilo 13.2.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS1 se stabilitou laseru 3 nm a s počtem interpolačních bodů 11. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

V tabulce 14 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Zeleně jsou označeny ty hodnoty, které se zlepšily alespoň o 50 % po kompenzaci a naopak červeně jsou označeny hodnoty, které se zhoršily (zde už nezáleží o kolik procent). Světlé modré označené typy chyb jsou změřeny pomocí přístroje LaserTRACER a žlutě označené typy chyb jsou naměřeny pomocí přístroje Ballbar QC20-W. Z tabulky jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU a pomocí ballbaru a to až o 56,5  $\mu\text{rad}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 0,5  $\mu\text{m}$ .

Na obrázku 61 jsou znázorněny tyto chyby graficky.

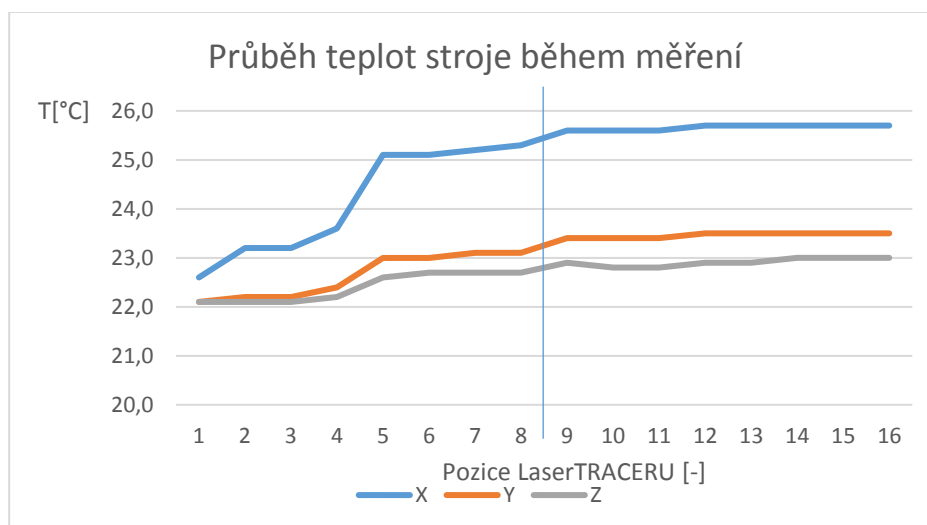
Tab 14) Naměřené hodnoty měření č. 2 před a po kompenzaci

			Kalibrace	Verifikace	Rozdíl	
					Absolutní	Relativní
kruhovitost	Kruhovitost v rovině X-Y	$\mu\text{m}$	8,9	3,2	5,70	64,0%
	Kruhovitost v rovině Y-Z	$\mu\text{m}$	10,2	6,0	4,20	41,2%
	Kruhovitost v rovině Z-X	$\mu\text{m}$	9,3	6,0	3,30	35,5%
VCS	Volumetrická odchylka	$\mu\text{m}$	43,0	8,0	35,00	81,4%
kolmost	Kolmost v rovině X-Y	$\mu\text{rad}$	29,6	-5,5	24,10	81,4%
	Kolmost v rovině Z-X	$\mu\text{rad}$	-59,2	-2,7	56,50	95,4%
	Kolmost v rovině Y-Z	$\mu\text{rad}$	33,1	-3,0	30,10	90,9%
	Kolmost v rovině X-Y	$\mu\text{m/m}$	13,6	7,6	6,00	44,1%
	Kolmost v rovině Z-X	$\mu\text{m/m}$	42,2	-10,0	32,20	76,3%
	Kolmost v rovině Y-Z	$\mu\text{m/m}$	50,5	-5,0	45,50	90,1%
přímost	Odchylka přímosti Y ve směru osy X	$\mu\text{m}$	5,4	2,1	3,30	61,1%
	Odchylka přímosti Z ve směru osy X	$\mu\text{m}$	2,2	1,7	0,50	22,7%
	Odchylka přímosti X ve směru osy Y	$\mu\text{m}$	1,7	1,4	0,30	17,6%
	Odchylka přímosti Z ve směru osy Y	$\mu\text{m}$	2,2	0,4	1,80	81,8%
	Odchylka přímosti X ve směru osy Z	$\mu\text{m}$	9,6	0,4	9,20	95,8%
	Odchylka přímosti Y ve směru osy Z	$\mu\text{m}$	2,8	0,7	2,10	75,0%
	Přímochařost X (Rovina XY)	$\mu\text{m}$	-3,7	-1,1	2,60	70,3%
	Přímochařost Y (Rovina XY)	$\mu\text{m}$	-0,7	-0,1	0,60	85,7%
	Přímochařost X (Rovina ZX)	$\mu\text{m}$	0,6	-1,1	-0,50	-83,3%
	Přímochařost Z (Rovina ZX)	$\mu\text{m}$	11,2	-2,0	9,20	82,1%
	Přímochařost Y (Rovina ZY)	$\mu\text{m}$	-1,2	1,1	0,10	8,3%
	Přímochařost Z (Rovina ZY)	$\mu\text{m}$	-0,8	-0,4	0,40	50,0%
poloha	Přesnost najetí do polohy v ose X	$\mu\text{m}$	29,1	3,9	25,20	86,6%
	Přesnost najetí do polohy v ose Y	$\mu\text{m}$	14,5	1,0	13,50	93,1%
	Přesnost najetí do polohy v ose Z	$\mu\text{m}$	9,9	6,6	3,30	33,3%
čas	Mapování 1 pozice LTc	mm:ss	10:35	10:35		



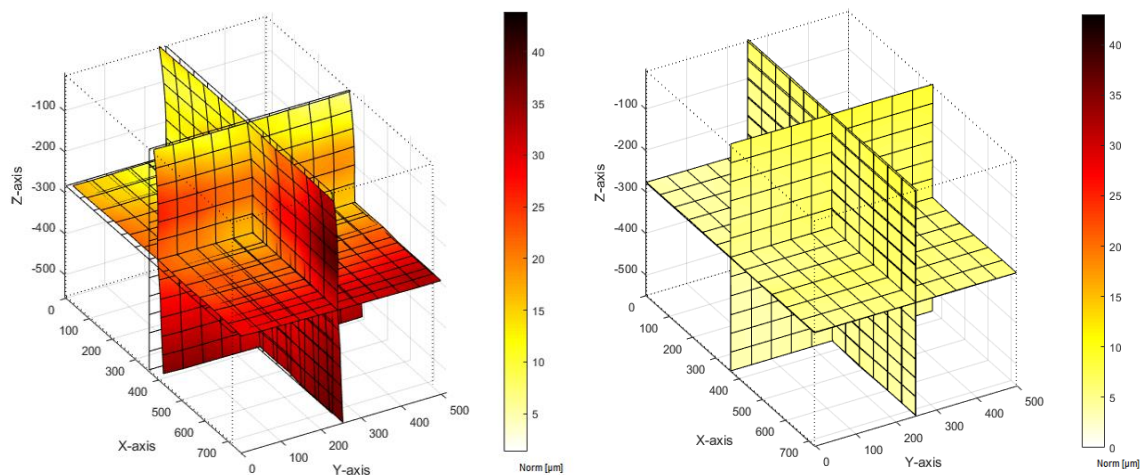
Obr. 61 Graficky zobrazené hodnoty měření č. 2

Na obrázku 62 jsou zobrazeny průběhy teplot os obráběcího stroje. Do bodu 8 jsou teploty zaznamenávány pro kalibrační měření a za tímto bodem teploty pro verifikační měření. Z obrázku je patrné, že při kalibračním měření se stroj trochu zahřívá, a naopak u verifikačního měření jsou teploty os ustálené. U verifikačního měření se teploty změnily o 0,2 °C. Nejvíce zahřátá osa stroje byla osa X (25,7 °C).



Obr. 62 Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 2

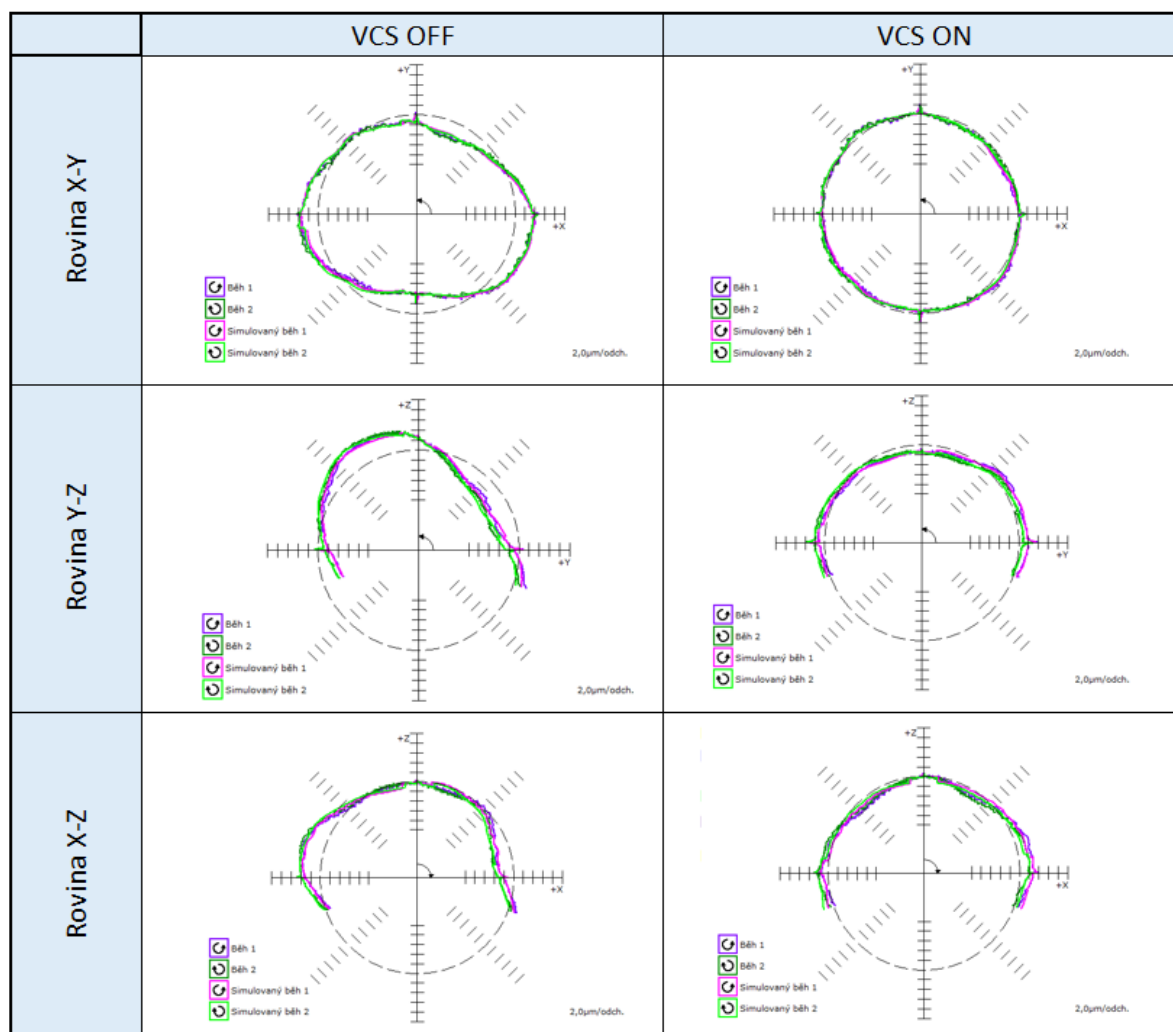
Software TRAC-CAL umožňuje vykreslit základní zobrazení volumetrických odchylek v kontrolovaném prostoru. Toto zobrazení je na obrázku 63. V levé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při kalibračním měření, tedy v původním stavu stroje bez zapnutých kompenzací. Výsledná volumetrická chyba je 43,0 μm. V pravé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při verifikačním měření, tedy ve stavu stroje, kdy má aktivovanou volumetrickou kompenzaci. Výsledná volumetrická chyba je 8,0 μm. Z obrázků 63a,b je na první pohled patrné, že se volumetrická chyba zmenšila.



Obr. 63 Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 2

a) před kompenzací b) po kompenzací

Na obrázku 64 jsou zobrazeny výsledky měření zkoušky kruhové interpolace pomocí zařízení Ballbar QC20-W. Z obrázku 64 je patrné zlepšení ve všech třech rovinách. Například v rovině X-Y se kruhovitost zlepšila z 8,9 μm na 3,2 μm.



Obr. 64 Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 2

## Příloha 2: Měření č. 3

Měření č. 3 se uskutečnilo 21.2.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS1 se stabilitou laseru 5 nm a s počtem interpolačních bodů 6. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

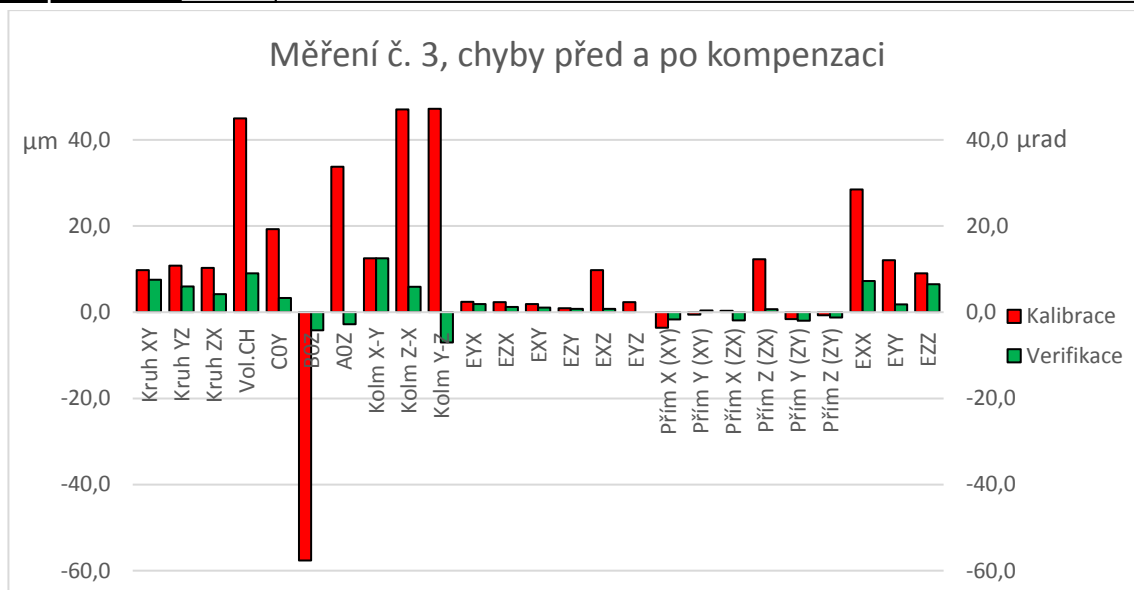
V tabulce 15 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Zeleně jsou označeny ty hodnoty, které se zlepšily alespoň o 50 % po kompenzaci a naopak červeně jsou označeny hodnoty, které se zhoršily (zde už nezáleží o kolik procent). Světlé modré označené typy chyb jsou změřeny pomocí přístroje LaserTRACER a žlutě označené typy chyb jsou naměřeny pomocí přístroje Ballbar QC20-W. Z tabulky jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU a pomocí ballbaru a to až o 53,4  $\mu$ rad. Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 1,6  $\mu$ m.

Na obrázku 65 jsou znázorněny tyto chyby graficky.

Tab 15) Naměřené hodnoty měření č. 3 před a po kompenzaci

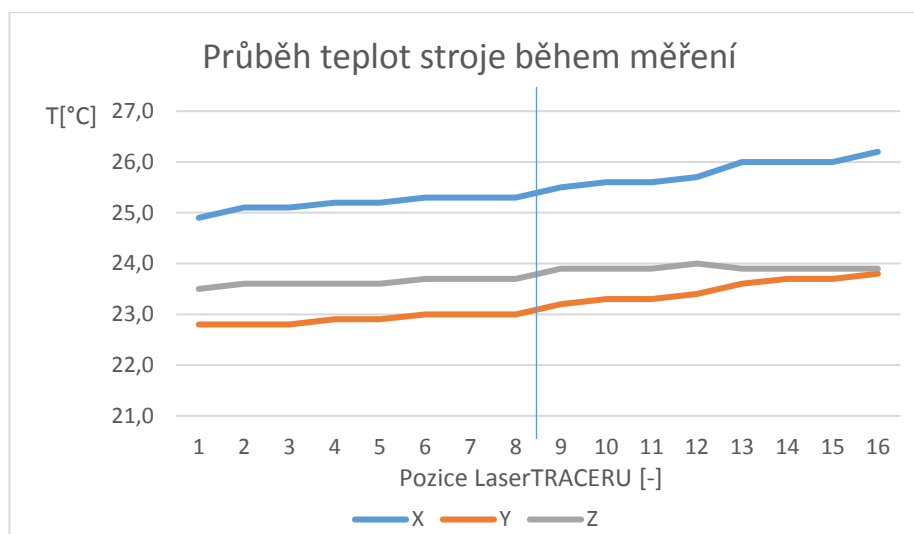
			Kalibrace	Verifikace	Rozdíl	
					Absolutní	Relativní
kruhovitost	Kruhovitost v rovině X-Y	μm	9,8	7,5	2,30	23,5%
	Kruhovitost v rovině Y-Z	μm	10,8	6,0	4,80	44,4%
	Kruhovitost v rovině Z-X	μm	10,3	4,2	6,10	59,2%
VCS	Volumetrická odchylka	μm	45,0	9,0	36,00	80,0%
kolmost	Kolmost v rovině X-Y	μrad	19,3	3,3	16,00	82,9%
	Kolmost v rovině Z-X	μrad	-57,6	-4,2	53,40	92,7%
	Kolmost v rovině Y-Z	μrad	33,8	-2,8	31,00	91,7%
	Kolmost v rovině X-Y	μm/m	12,5	12,5	0,00	0,0%
	Kolmost v rovině Z-X	μm/m	47,1	5,9	41,20	87,5%
	Kolmost v rovině Y-Z	μm/m	47,2	-7,0	40,20	85,2%
přímmost	Odchylka přímosti Y ve směru osy X	μm	2,4	1,9	0,50	20,8%
	Odchylka přímosti Z ve směru osy X	μm	2,3	1,2	1,10	47,8%
	Odchylka přímosti X ve směru osy Y	μm	1,9	1,1	0,80	42,1%
	Odchylka přímosti Z ve směru osy Y	μm	0,9	0,8	0,10	11,1%
	Odchylka přímosti X ve směru osy Z	μm	9,8	0,8	9,00	91,8%
	Odchylka přímosti Y ve směru osy Z	μm	2,3	0,0	2,30	100,0%
	Přímočarost X (Rovina XY)	μm	-3,6	-1,7	1,90	52,8%
	Přímočarost Y (Rovina XY)	μm	-0,6	0,4	0,20	33,3%
	Přímočarost X (Rovina ZX)	μm	0,3	-1,9	-1,60	-533,3%
	Přímočarost Z (Rovina ZX)	μm	12,3	0,7	11,60	94,3%
	Přímočarost Y (Rovina ZY)	μm	-1,6	-2,0	-0,40	-25,0%
	Přímočarost Z (Rovina ZY)	μm	-0,7	-1,2	-0,50	-71,4%
poloha	Přesnost najetí do polohy v ose X	μm	28,5	7,2	21,30	74,7%
	Přesnost najetí do polohy v ose Y	μm	12,1	1,8	10,30	85,1%
	Přesnost najetí do polohy v ose Z	μm	9,0	6,5	2,50	27,8%
čas	Mapování 1 pozice LTc	mm:ss	6:30	6:30		





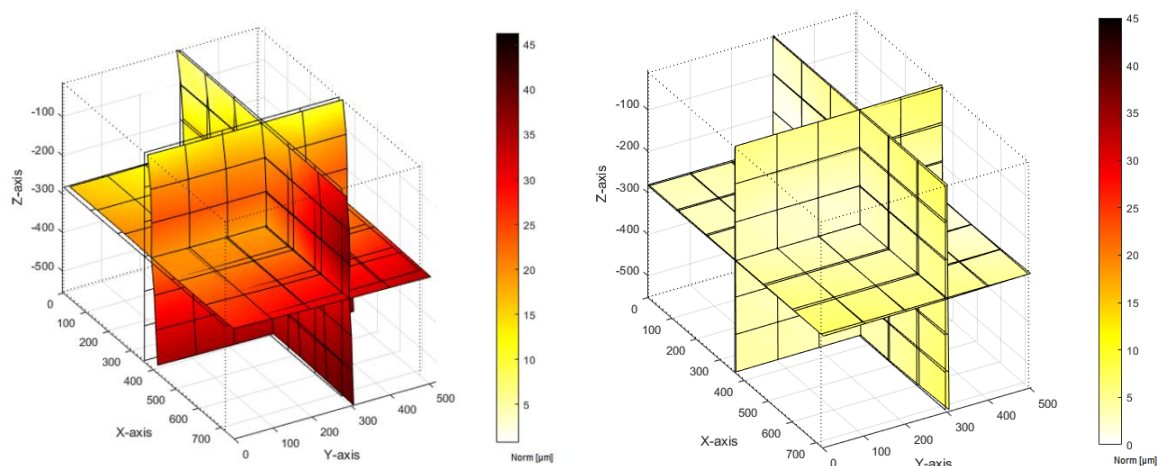
Obr. 65 Graficky zobrazené hodnoty měření č. 3

Na obrázku 66 jsou zobrazeny průběhy teplot os obráběcího stroje. Do bodu 8 jsou teploty zaznamenávány pro kalibrační měření a za tímto bodem teploty pro verifikační měření. Z obrázku je patrné, že u obou měření jsou teploty os ustálené. U verifikačního měření se teploty změnily o 0,7 °C. Nejvíce zahřátá osa stroje byla osa X (26,2) °C.



Obr. 66 Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 3

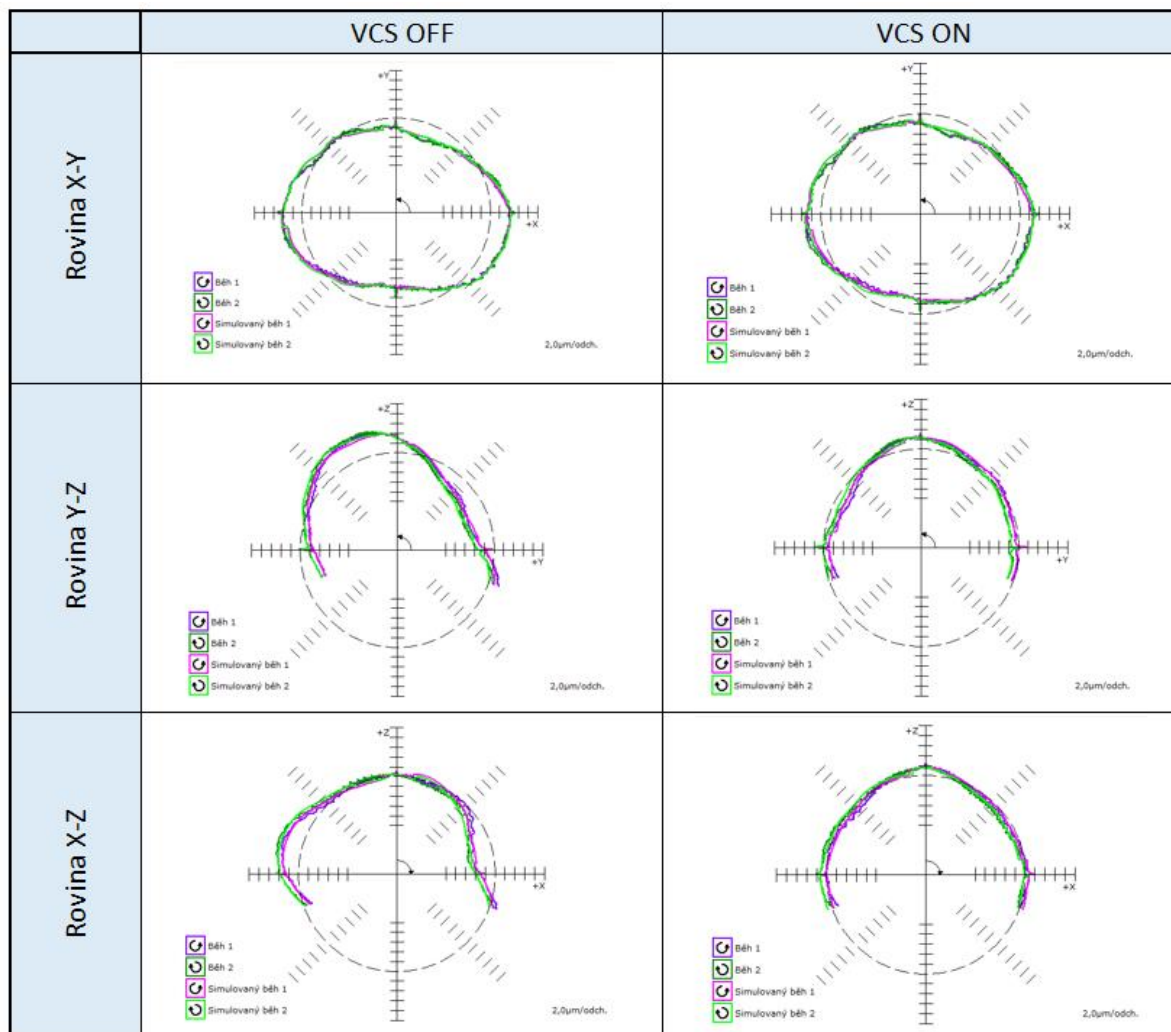
Software TRAC-CAL umožňuje vykreslit základní zobrazení volumetrických odchylek v kontrolovaném prostoru. Toto zobrazení je na obrázku 67. V levé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při kalibračním měření, tedy v původním stavu stroje bez zapnutých kompenzací. Výsledná volumetrická chyba je 45,0 μm. V pravé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při verifikačním měření, tedy ve stavu stroje, kdy má aktivovanou volumetrickou kompenzaci. Výsledná volumetrická chyba je 9,0 μm. Z obrázků 67a,b je na první pohled patrné, že se volumetrická chyba zmenšila.



Obr. 67 Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 3

a) před kompenzací b) po kompenzací

Na obrázku 68 jsou zobrazeny výsledky měření zkoušky kruhové interpolace pomocí zařízení Ballbar QC20-W. Z obrázku 68 je patrné zlepšení ve všech třech rovinách. Například v rovině X-Y se kruhovitost zlepšila z 9,8 μm na 7,5 μm.



Obr. 68 Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 3

### Příloha 3: Měření č. 4

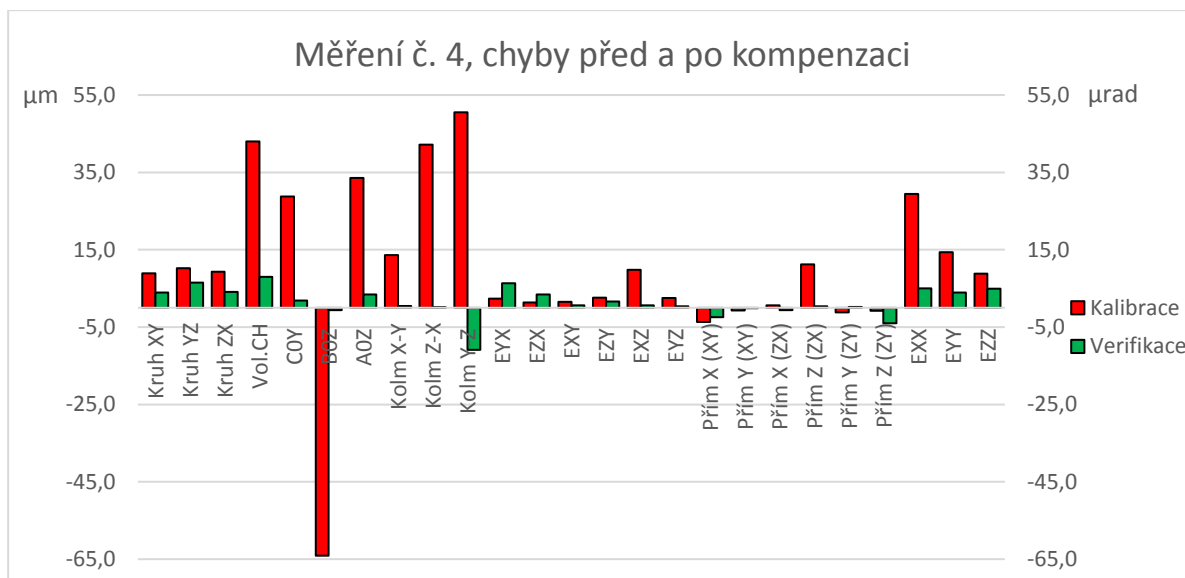
Měření č. 4 se uskutečnilo 13.2.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS1 se stabilitou laseru 5 nm a s počtem interpolačních bodů 11. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

V tabulce 16 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Zeleně jsou označeny ty hodnoty, které se zlepšily alespoň o 50 % po kompenzaci a naopak červeně jsou označeny hodnoty, které se zhoršily (zde už nezáleží o kolik procent). Světlé modré označené typy chyb jsou změřeny pomocí přístroje LaserTRACER a žlutě označené typy chyb jsou naměřeny pomocí přístroje Ballbar QC20-W. Z tabulky jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU a pomocí ballbaru a to až o 63,50  $\mu\text{m}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 3,9  $\mu\text{m}$ .

Na obrázku 69 jsou znázorněny tyto chyby graficky.

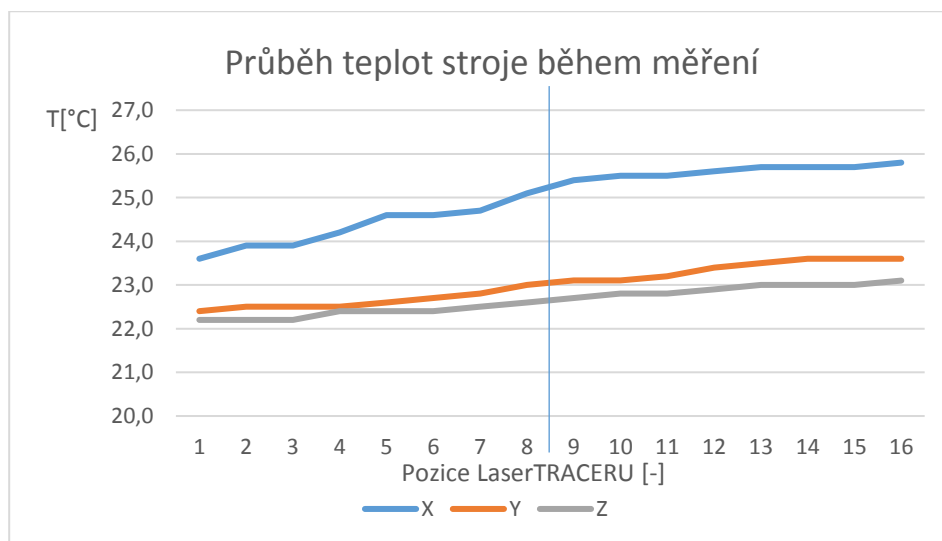
Tab 16) Naměřené hodnoty měření č. 4 před a po kompenzaci

			Kalibrace	Verifikace	Rozdíl	
					Absolutní	Relativní
kruhovitost	Kruhovitost v rovině X-Y	μm	8,9	3,9	5,00	56,2%
	Kruhovitost v rovině Y-Z	μm	10,2	6,5	3,70	36,3%
	Kruhovitost v rovině Z-X	μm	9,3	4,1	5,20	55,9%
VCS	Volumetrická odchylka	μm	43,0	8,0	35,00	81,4%
kolmost	Kolmost v rovině X-Y	μrad	28,8	1,9	26,90	93,4%
	Kolmost v rovině Z-X	μrad	-64,1	-0,6	63,50	99,1%
	Kolmost v rovině Y-Z	μrad	33,6	3,4	30,20	89,9%
	Kolmost v rovině X-Y	μm/m	13,6	0,5	13,10	96,3%
	Kolmost v rovině Z-X	μm/m	42,2	0,1	42,10	99,8%
	Kolmost v rovině Y-Z	μm/m	50,5	-10,9	39,60	78,4%
přímost	Odchylka přímosti Y ve směru osy X	μm	2,4	6,3	-3,90	-162,5%
	Odchylka přímosti Z ve směru osy X	μm	1,4	3,4	-2,00	-142,9%
	Odchylka přímosti X ve směru osy Y	μm	1,5	0,6	0,90	60,0%
	Odchylka přímosti Z ve směru osy Y	μm	2,6	1,6	1,00	38,5%
	Odchylka přímosti X ve směru osy Z	μm	9,8	0,6	9,20	93,9%
	Odchylka přímosti Y ve směru osy Z	μm	2,5	0,4	2,10	84,0%
	Přímochařost X (Rovina XY)	μm	-3,7	-2,4	1,30	35,1%
	Přímochařost Y (Rovina XY)	μm	-0,7	-0,1	0,60	85,7%
	Přímochařost X (Rovina ZX)	μm	0,6	-0,6	0,00	0,0%
	Přímochařost Z (Rovina ZX)	μm	11,2	0,4	10,80	96,4%
	Přímochařost Y (Rovina ZY)	μm	-1,2	0,2	1,00	83,3%
	Přímochařost Z (Rovina ZY)	μm	-0,8	-4,0	-3,20	-400,0%
poloha	Přesnost najetí do polohy v ose X	μm	29,4	5,0	24,40	83,0%
	Přesnost najetí do polohy v ose Y	μm	14,4	3,9	10,50	72,9%
	Přesnost najetí do polohy v ose Z	μm	8,8	4,9	3,90	44,3%
čas	Mapování 1 pozice LTc	mm:ss	10:35	10:35		



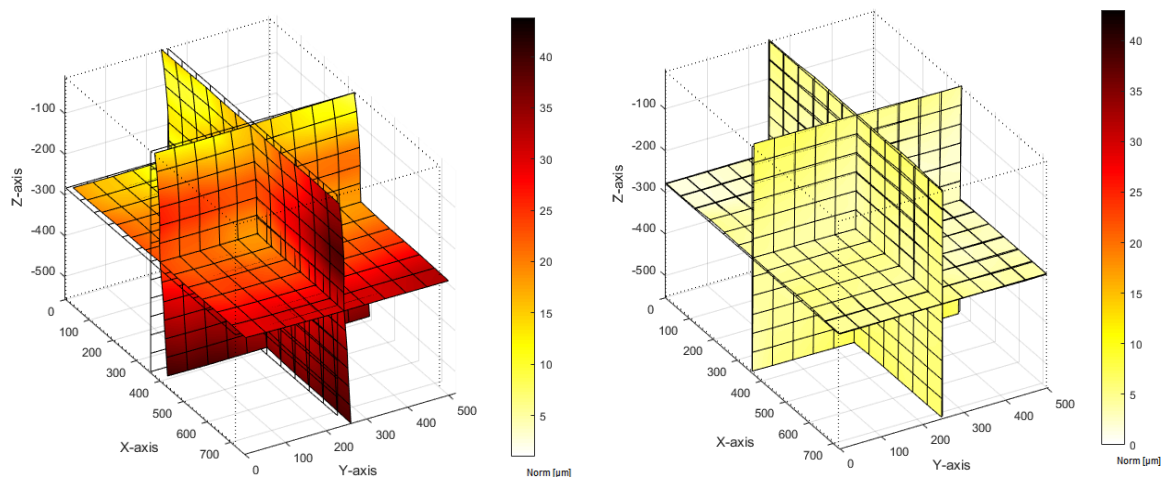
Obr. 69 Graficky zobrazené hodnoty měření č. 4

Na obrázku 70 jsou zobrazeny průběhy teplot os obráběcího stroje. Do bodu 8 jsou teploty zaznamenávány pro kalibrační měření a za tímto bodem teploty pro verifikační měření. Z obrázku je patrné, že při kalibračním měření se stroj trochu zahřívá, a naopak u verifikačního měření jsou teploty os ustálené. U verifikačního měření se teploty změnily o 0,5 °C. Nejvíce zahřátá osa stroje byla osa X (25,8 °C).



Obr. 70 Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 4

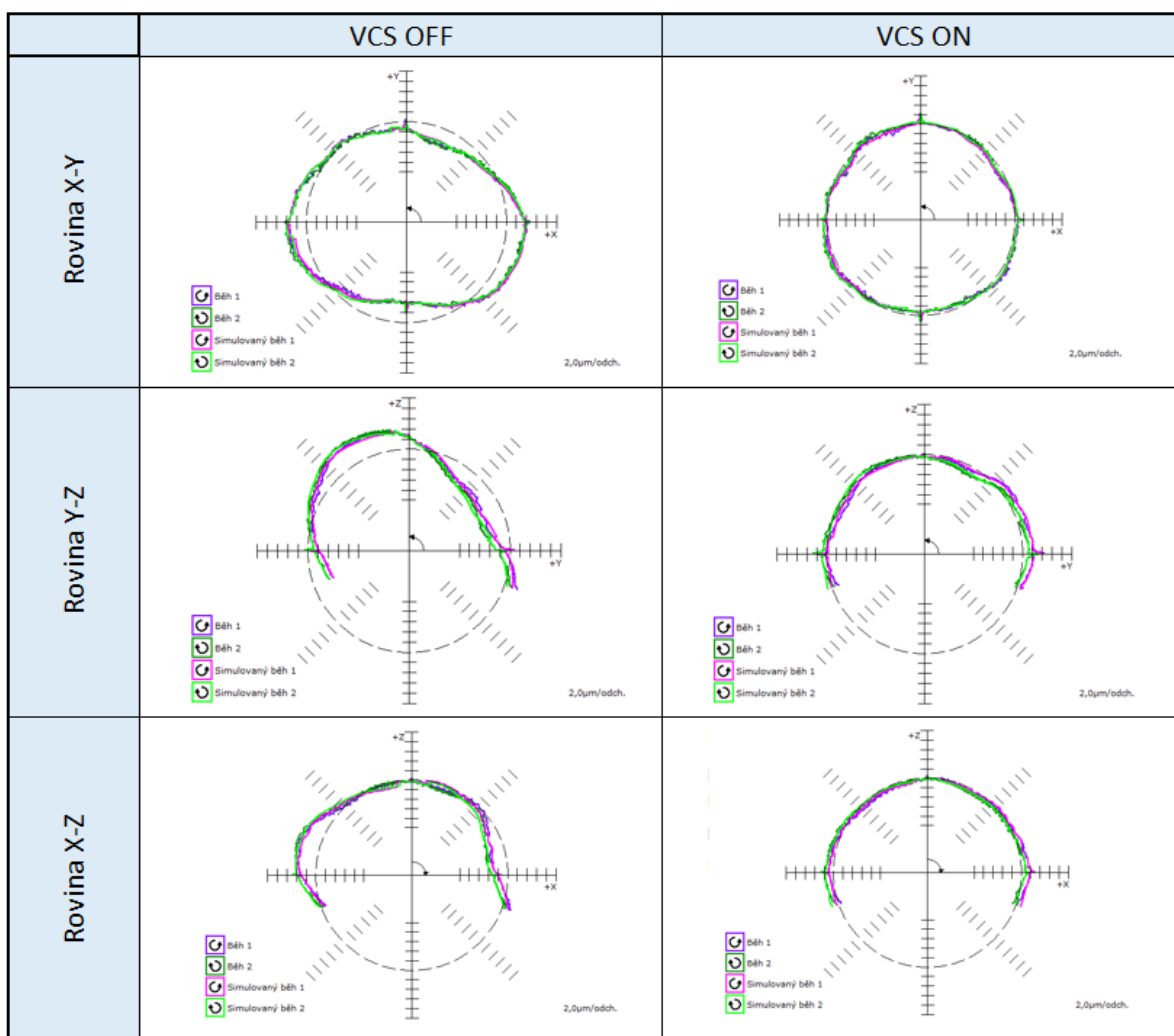
Software TRAC-CAL umožňuje vykreslit základní zobrazení volumetrických odchylek v kontrolovaném prostoru. Toto zobrazení je na obrázku 71. V levé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při kalibračním měření, tedy v původním stavu stroje bez zapnutých kompenzací. Výsledná volumetrická chyba je 43,0 μm. V pravé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při verifikačním měření, tedy ve stavu stroje, kdy má aktivovanou volumetrickou kompenzaci. Výsledná volumetrická chyba je 8,0 μm. Z obrázků 71a,b je na první pohled patrné, že se volumetrická chyba zmenšila.



Obr. 71 Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 4

a) před kompenzací b) po kompenzací

Na obrázku 72 jsou zobrazeny výsledky měření zkoušky kruhové interpolace pomocí zařízení Ballbar QC20-W. Z obrázku 72 je patrné zlepšení ve všech třech rovinách. Například v rovině X-Y se kruhovitost zlepšila z 8,9 μm na 3,9 μm.



Obr. 72 Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 4

#### Příloha 4: Měření č. 5

Měření č. 5 se uskutečnilo 8.3.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS2 se stabilitou laseru 3 nm a s počtem interpolačních bodů 6. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

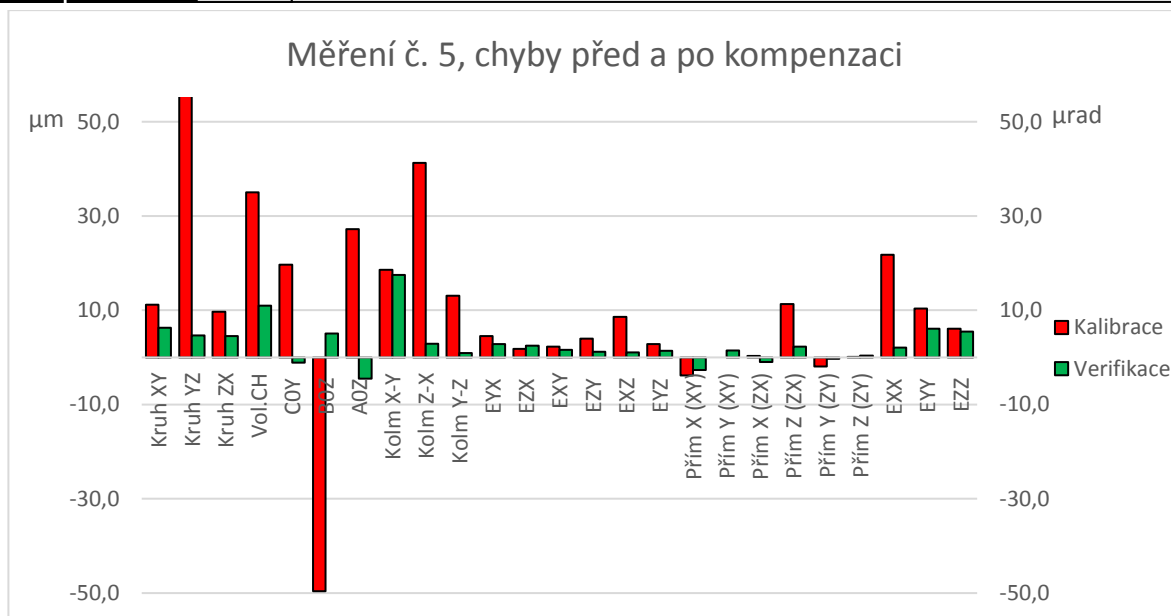
V tabulce 17 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Zeleně jsou označeny ty hodnoty, které se zlepšily alespoň o 50 % po kompenzaci a naopak červeně jsou označeny hodnoty, které se zhoršily (zde už nezáleží o kolik procent). Světlé modré označené typy chyb jsou změřeny pomocí přístroje LaserTRACER a žlutě označené typy chyb jsou naměřeny pomocí přístroje Ballbar QC20-W. Z tabulky jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU a pomocí ballbaru a to až o 59,80  $\mu\text{m}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 1,5  $\mu\text{m}$ .

Na obrázku 73 jsou znázorněny tyto chyby graficky.

Tab 17) Naměřené hodnoty měření č. 5 před a po kompenzaci

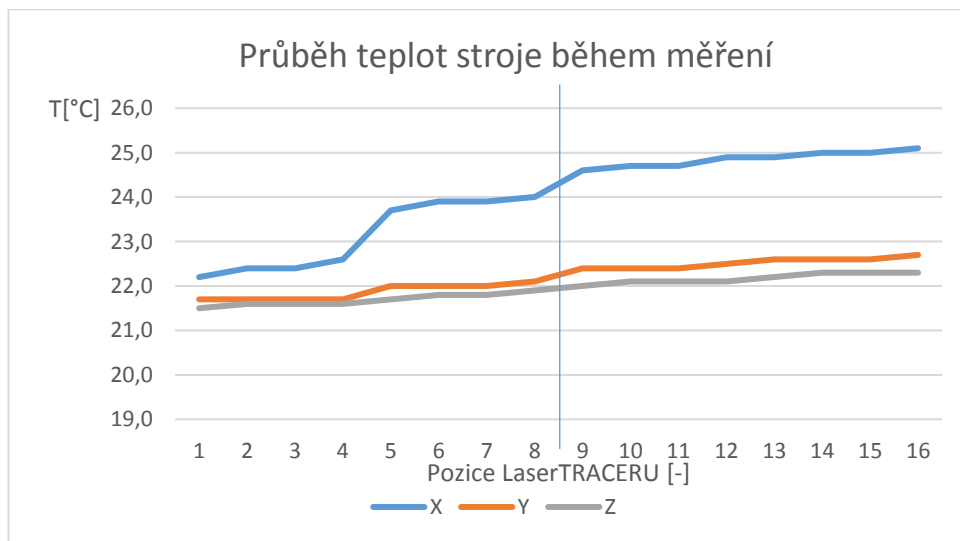
			Kalibrace	Verifikace	Rozdíl	
					Absolutní	Relativní
kruhovitost	Kruhovitost v rovině X-Y	µm	11,2	6,3	4,90	43,8%
	Kruhovitost v rovině Y-Z	µm	13,1	4,7	8,40	64,1%
	Kruhovitost v rovině Z-X	µm	9,7	4,5	5,20	53,6%
VCS	Volumetrická odchylka	µm	35,0	11,0	24,00	68,6%
kolmost	C0Y Kolmost v rovině X-Y	µrad	19,7	-1,1	18,60	94,4%
	B0Z Kolmost v rovině Z-X	µrad	-49,6	5,1	44,50	89,7%
	A0Z Kolmost v rovině Y-Z	µrad	27,2	-4,5	22,70	83,5%
	Kolmost v rovině X-Y	µm/m	18,6	17,5	1,10	5,9%
	Kolmost v rovině Z-X	µm/m	41,3	2,9	38,40	93,0%
	Kolmost v rovině Y-Z	µm/m	60,7	0,9	59,80	98,5%
přímost	EYX Odchylka přímosti Y ve směru osy	µm	4,5	2,8	1,70	37,8%
	EZX Odchylka přímosti Z ve směru osy	µm	1,8	2,5	-0,70	-38,9%
	EXY Odchylka přímosti X ve směru osy	µm	2,3	1,6	0,70	30,4%
	EZY Odchylka přímosti Z ve směru osy	µm	4,0	1,2	2,80	70,0%
	EXZ Odchylka přímosti X ve směru osy	µm	8,6	1,1	7,50	87,2%
	EYZ Odchylka přímosti Y ve směru osy	µm	2,8	1,4	1,40	50,0%
	Přímochařost X (Rovina XY)	µm	-3,8	-2,7	1,10	28,9%
	Přímochařost Y (Rovina XY)	µm	0,0	1,5	-1,50	-150,0%
	Přímochařost X (Rovina ZX)	µm	0,3	-1,0	-0,70	-233,3%
	Přímochařost Z (Rovina ZX)	µm	11,3	2,3	9,00	79,6%
	Přímochařost Y (Rovina ZY)	µm	-1,9	-0,3	1,60	84,2%
	Přímochařost Z (Rovina ZY)	µm	0,1	0,4	-0,30	-300,0%
poloha	EXX Přesnost najetí do polohy v ose X	µm	21,8	2,1	19,70	90,4%
	EYY Přesnost najetí do polohy v ose Y	µm	10,4	6,1	4,30	41,3%
	EZZ Přesnost najetí do polohy v ose Z	µm	6,1	5,5	0,60	9,8%
čas	Mapování 1 pozice LTc	mm:ss	6:00	6:00		





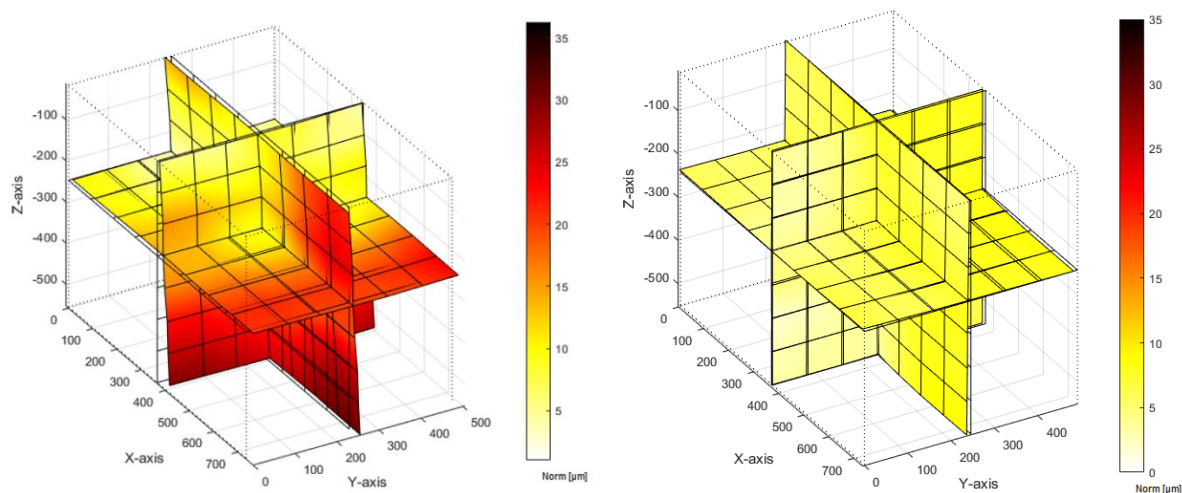
Obr. 73 Graficky zobrazené hodnoty měření č. 5

Na obrázku 74 jsou zobrazeny průběhy teplot os obráběcího stroje. Do bodu 8 jsou teploty zaznamenávány pro kalibrační měření a za tímto bodem teploty pro verifikační měření. Z obrázku je patrné, že při kalibračním měření se stroj trochu zahřívá, a naopak u verifikačního měření jsou teploty os ustálené. U verifikačního měření se teploty změnily o 0,5 °C. Nejvíce zahřátá osa stroje byla osa X (25,1 °C).



Obr. 74 Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 5

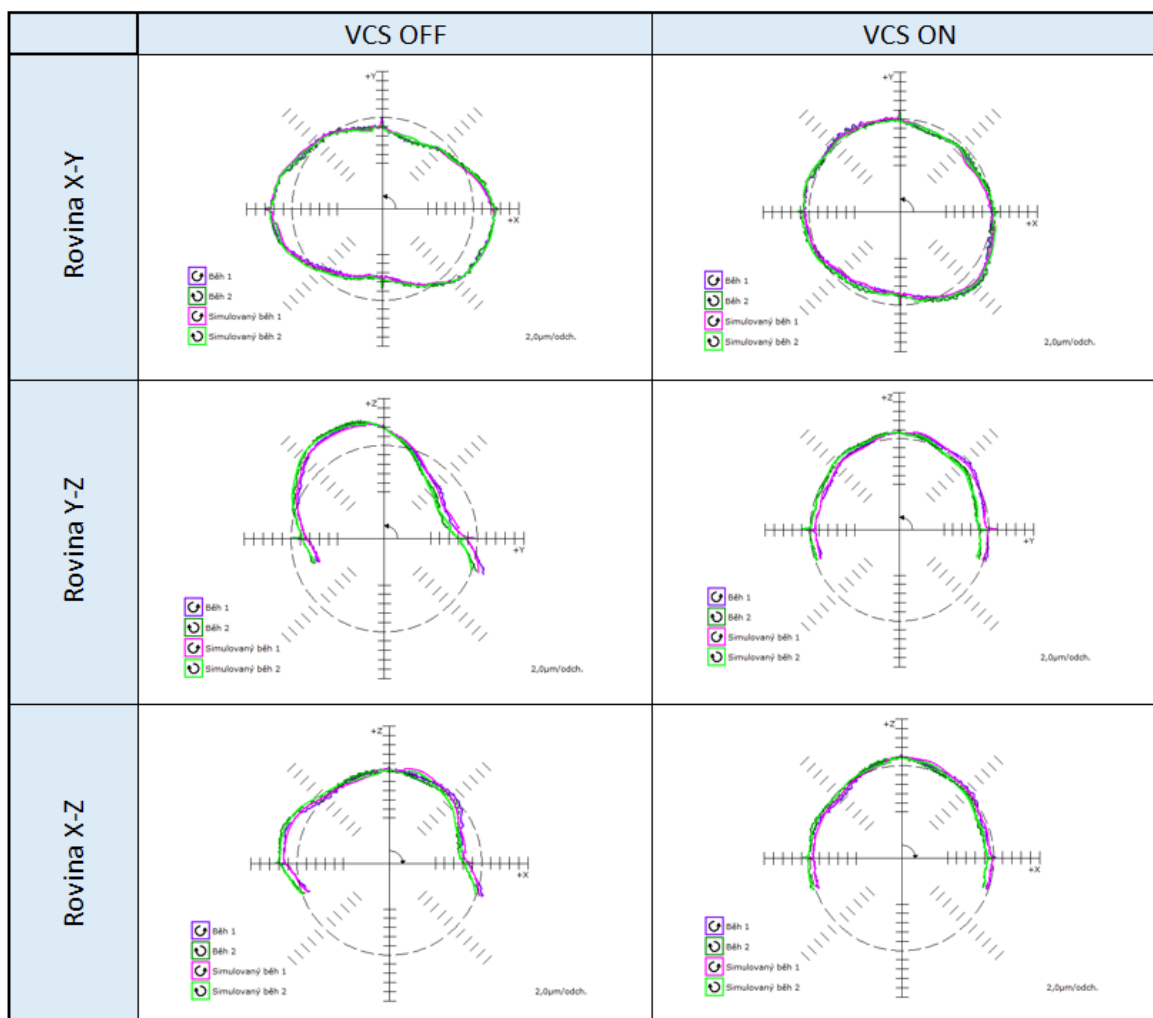
Software TRAC-CAL umožňuje vykreslit základní zobrazení volumetrických odchylek v kontrolovaném prostoru. Toto zobrazení je na obrázku 75. V levé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při kalibračním měření, tedy v původním stavu stroje bez zapnutých kompenzací. Výsledná volumetrická chyba je 35 μm. V pravé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při verifikačním měření, tedy ve stavu stroje, kdy má aktivovanou volumetrickou kompenzaci. Výsledná volumetrická chyba je 11 μm. Z obrázků 75a,b je na první pohled patrné, že se volumetrická chyba zmenšila.



Obr. 75 Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 5

a) před kompenzací b) po kompenzací

Na obrázku 76 jsou zobrazeny výsledky měření zkoušky kruhové interpolace pomocí zařízení Ballbar QC20-W. Z obrázku 76 je patrné zlepšení ve všech třech rovinách. Například v rovině X-Y se kruovitost zlepšila z 11,2 µm na 6,3 µm.



Obr. 76 Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 5



## Příloha 5: Měření č. 6

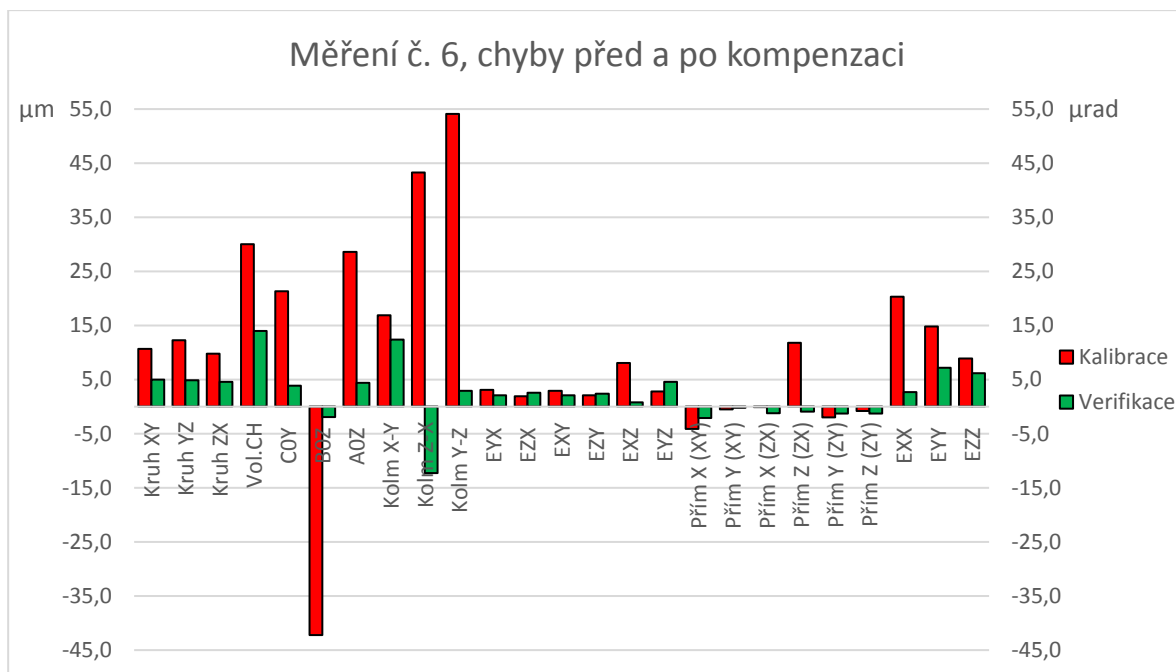
Měření č. 6 se uskutečnilo 1.4.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS2 se stabilitou laseru 3 nm a s počtem interpolačních bodů 11. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

V tabulce 18 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Zeleně jsou označeny ty hodnoty, které se zlepšily alespoň o 50 % po kompenzaci a naopak červeně jsou označeny hodnoty, které se zhoršily (zde už nezáleží o kolik procent). Světlé modré označené typy chyb jsou změřeny pomocí přístroje LaserTRACER a žlutě označené typy chyb jsou naměřeny pomocí přístroje Ballbar QC20-W. Z tabulky jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU a pomocí ballbaru a to až o 51,20  $\mu\text{m}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 1,8  $\mu\text{m}$ .

Na obrázku 77 jsou znázorněny tyto chyby graficky.

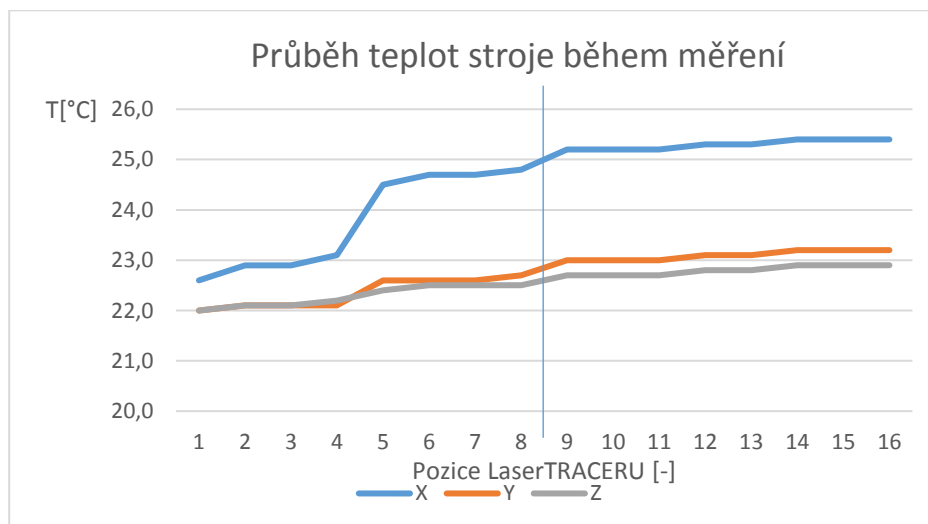
Tab 18) Naměřené hodnoty měření č. 6 před a po kompenzaci

			Kalibrace	Verifikace	Rozdíl	
					Absolutní	Relativní
kruhovitost	Kruhovitost v rovině X-Y	μm	10,7	5,0	5,70	53,3%
	Kruhovitost v rovině Y-Z	μm	12,3	4,9	7,40	60,2%
	Kruhovitost v rovině Z-X	μm	9,8	4,6	5,20	53,1%
VCS	Volumetrická odchylka	μm	30,0	14,0	16,00	53,3%
kolmost	Kolmost v rovině X-Y	μrad	21,3	3,9	17,40	81,7%
	Kolmost v rovině Z-X	μrad	-42,2	-1,9	40,30	95,5%
	Kolmost v rovině Y-Z	μrad	28,6	4,4	24,20	84,6%
	Kolmost v rovině X-Y	μm/m	16,9	12,4	4,50	26,6%
	Kolmost v rovině Z-X	μm/m	43,3	-12,3	31,00	71,6%
	Kolmost v rovině Y-Z	μm/m	54,1	2,9	51,20	94,6%
přímost	Odchylka přímosti Y ve směru osy X	μm	3,1	2,1	1,00	32,3%
	Odchylka přímosti Z ve směru osy X	μm	1,9	2,6	-0,70	-36,8%
	Odchylka přímosti X ve směru osy Y	μm	2,9	2,1	0,80	27,6%
	Odchylka přímosti Z ve směru osy Y	μm	2,1	2,4	-0,30	-14,3%
	Odchylka přímosti X ve směru osy Z	μm	8,1	0,8	7,30	90,1%
	Odchylka přímosti Y ve směru osy Z	μm	2,8	4,6	-1,80	-64,3%
	Přímochařost X (Rovina XY)	μm	-4,1	-2,1	2,00	48,8%
	Přímochařost Y (Rovina XY)	μm	-0,5	-0,2	0,30	60,0%
	Přímochařost X (Rovina ZX)	μm	-0,1	-1,2	-1,10	-1100,0%
	Přímochařost Z (Rovina ZX)	μm	11,8	-0,9	10,90	92,4%
	Přímochařost Y (Rovina ZY)	μm	-2,0	-1,3	0,70	35,0%
	Přímochařost Z (Rovina ZY)	μm	-0,8	-1,3	-0,50	-62,5%
poloha	Přesnost najetí do polohy v ose X	μm	20,3	2,7	17,60	86,7%
	Přesnost najetí do polohy v ose Y	μm	14,8	7,2	7,60	51,4%
	Přesnost najetí do polohy v ose Z	μm	8,9	6,2	2,70	30,3%
čas	Mapování 1 pozice LTc	mm:ss	9:30	9:30		



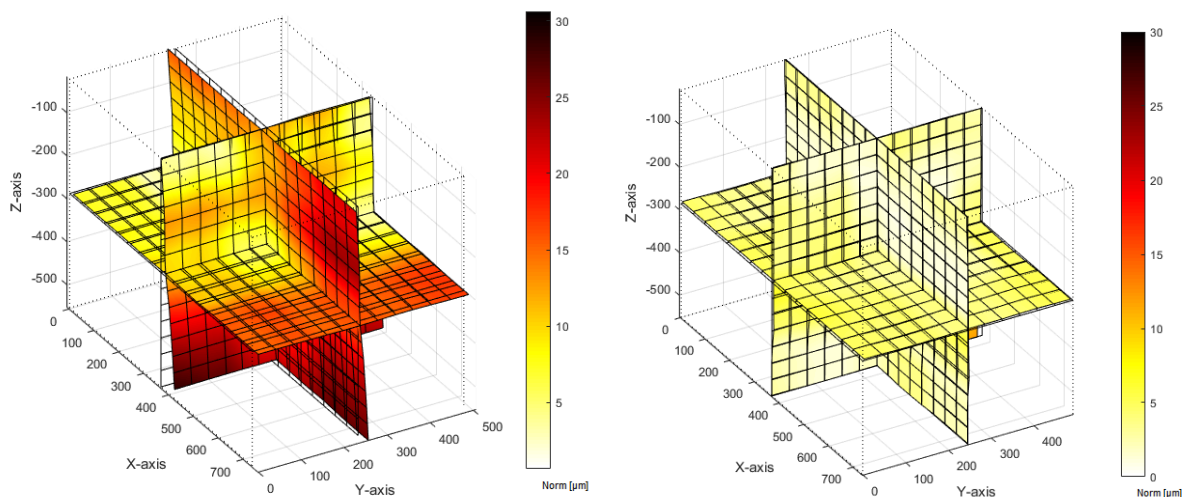
Obr. 77 Graficky zobrazené hodnoty měření č. 6

Na obrázku 78 jsou zobrazeny průběhy teplot os obráběcího stroje. Do bodu 8 jsou teploty zaznamenávány pro kalibrační měření a za tímto bodem teploty pro verifikační měření. Z obrázku je patrné, že při kalibračním měření se stroj trochu zahřívá, a naopak u verifikačního měření jsou teploty os ustálené. U verifikačního měření se teploty změnily o 0,2 °C. Nejvíce zahřátá osa stroje byla osa X (25,4 °C).



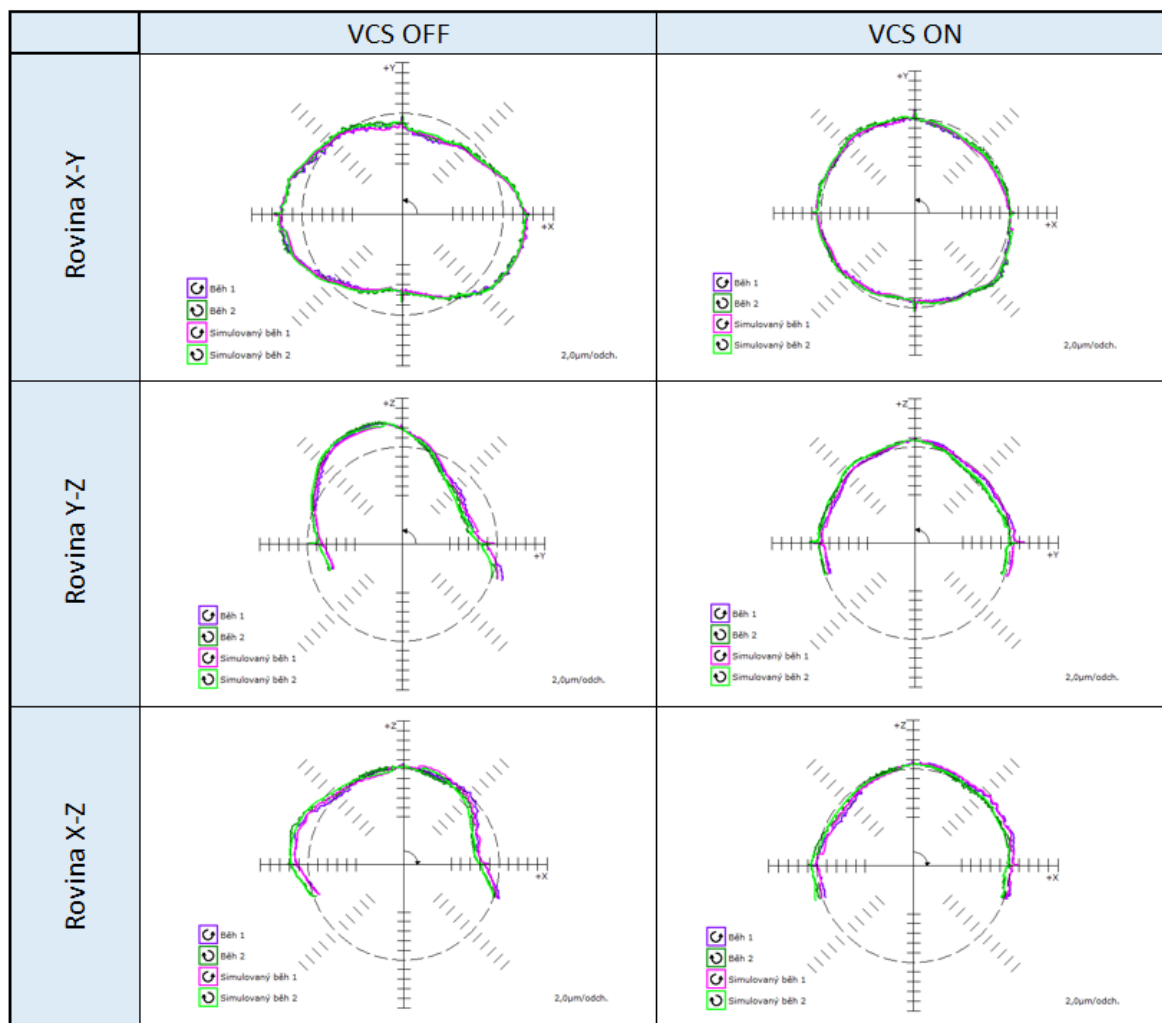
Obr. 78 Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 6

Software TRAC-CAL umožňuje vykreslit základní zobrazení volumetrických odchylek v kontrolovaném prostoru. Toto zobrazení je na obrázku 79. V levé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při kalibračním měření, tedy v původním stavu stroje bez zapnutých kompenzací. Výsledná volumetrická chyba je 30 μm. V pravé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při verifikačním měření, tedy ve stavu stroje, kdy má aktivovanou volumetrickou kompenzaci. Výsledná volumetrická chyba je 14 μm. Z obrázků 79a,b je na první pohled patrné, že se volumetrická chyba zmenšila.



Obr. 79 Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 6  
a) před kompenzací b) po kompenzací

Na obrázku 80 jsou zobrazeny výsledky měření zkoušky kruhové interpolace pomocí zařízení Ballbar QC20-W. Z obrázku 80 je patrné zlepšení ve všech třech rovinách. Například v rovině X-Y se kruhovitosť zlepšila z 10,7 μm na 5,0 μm.



Obr. 80 Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 6

## Příloha 6: Měření č. 7

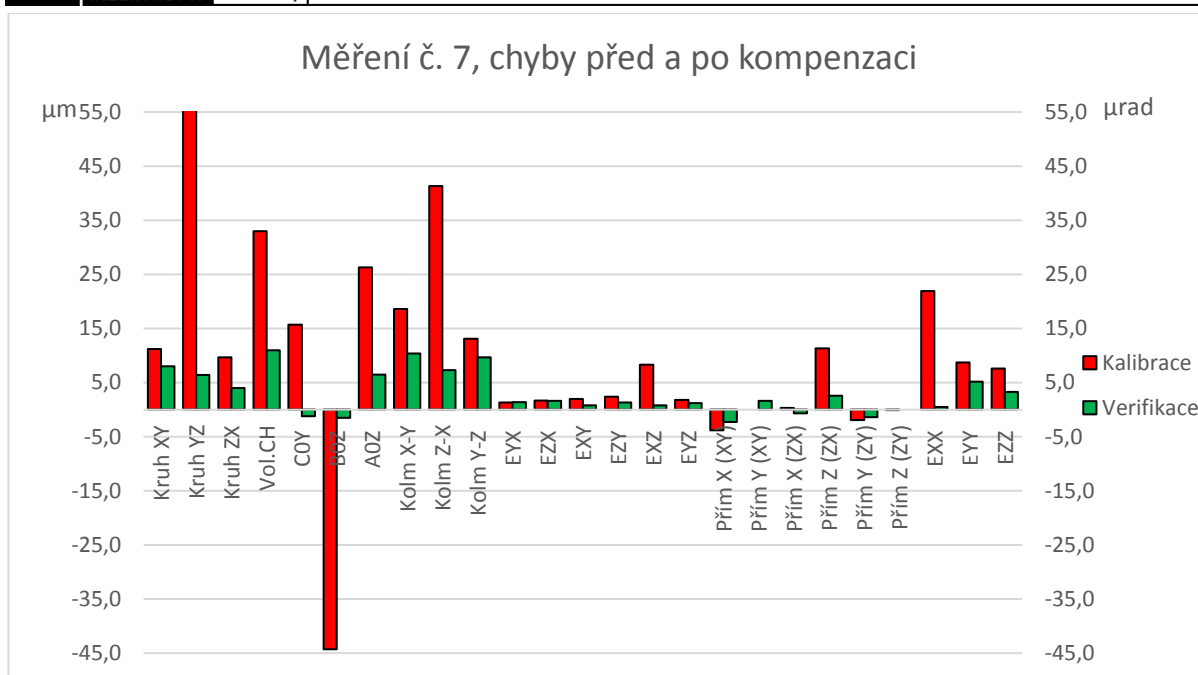
Měření č. 7 se uskutečnilo 8.3.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS2 se stabilitou laseru 5 nm a s počtem interpolačních bodů 6. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

V tabulce 19 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Zeleně jsou označeny ty hodnoty, které se zlepšily alespoň o 50 % po kompenzaci a naopak červeně jsou označeny hodnoty, které se zhoršily (zde už nezáleží o kolik procent). Světlé modré označené typy chyb jsou změřeny pomocí přístroje LaserTRACER a žlutě označené typy chyb jsou naměřeny pomocí přístroje Ballbar QC20-W. Z tabulky jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU a pomocí ballbaru a to až o 51,00  $\mu\text{m}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení o až 1,6  $\mu\text{m}$ .

Na obrázku 81 jsou znázorněny tyto chyby graficky.

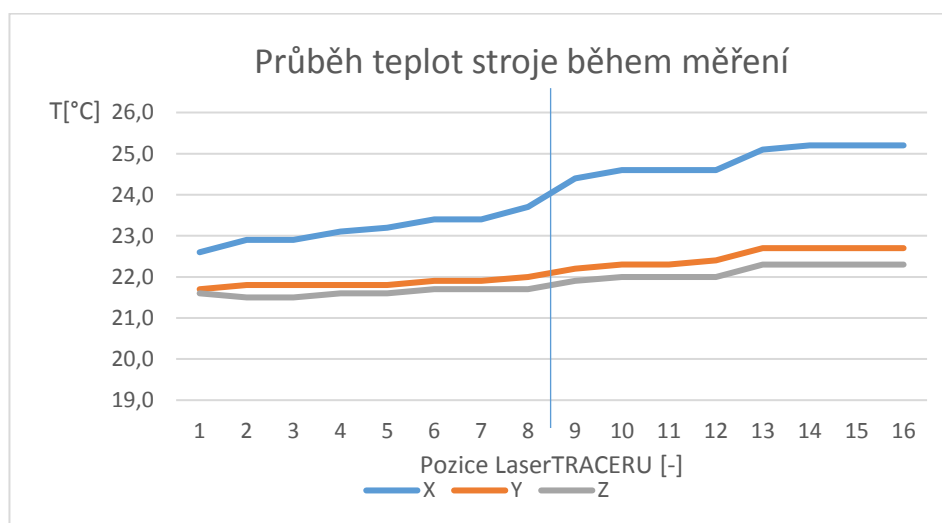
Tab 19) Naměřené hodnoty měření č. 7 před a po kompenzaci

			Kalibrace	Verifikace	Rozdíl	
					Absolutní	Relativní
kruhovitost	Kruhovitost v rovině X-Y	μm	11,2	8,0	3,20	28,6%
	Kruhovitost v rovině Y-Z	μm	13,1	6,4	6,70	51,1%
	Kruhovitost v rovině Z-X	μm	9,7	4,0	5,70	58,8%
VCS	Volumetrická odchylka	μm	33,0	11,0	22,00	66,7%
kolmost	C0Y Kolmost v rovině X-Y	μrad	15,7	-1,2	14,50	92,4%
	B0Z Kolmost v rovině Z-X	μrad	-44,3	-1,5	42,80	96,6%
	A0Z Kolmost v rovině Y-Z	μrad	26,3	6,5	19,80	75,3%
	Kolmost v rovině X-Y	μm/m	18,6	10,4	8,20	44,1%
	Kolmost v rovině Z-X	μm/m	41,3	7,3	34,00	82,3%
	Kolmost v rovině Y-Z	μm/m	60,7	9,7	51,00	84,0%
přímost	EYX Odchylka přímosti Y ve směru osy	μm	1,3	1,4	-0,10	-7,7%
	EZX Odchylka přímosti Z ve směru osy	μm	1,7	1,6	0,10	5,9%
	EXY Odchylka přímosti X ve směru osy	μm	2,0	0,8	1,20	60,0%
	EZY Odchylka přímosti Z ve směru osy	μm	2,4	1,3	1,10	45,8%
	EXZ Odchylka přímosti X ve směru osy	μm	8,3	0,8	7,50	90,4%
	EYZ Odchylka přímosti Y ve směru osy	μm	1,8	1,2	0,60	33,3%
	Přímochařost X (Rovina XY)	μm	-3,8	-2,3	1,50	39,5%
	Přímochařost Y (Rovina XY)	μm	0,0	1,6	-1,60	-160,0%
	Přímochařost X (Rovina ZX)	μm	0,3	-0,7	-0,40	-133,3%
	Přímochařost Z (Rovina ZX)	μm	11,3	2,6	8,70	77,0%
	Přímochařost Y (Rovina ZY)	μm	-1,9	-1,4	0,50	26,3%
	Přímochařost Z (Rovina ZY)	μm	-0,1	0,0	0,10	100,0%
poloha	EXX Přesnost najetí do polohy v ose X	μm	21,9	0,5	21,40	97,7%
	EYY Přesnost najetí do polohy v ose Y	μm	8,7	5,2	3,50	40,2%
	EZZ Přesnost najetí do polohy v ose Z	μm	7,6	3,3	4,30	56,6%
čas	Mapování 1 pozice LTc	mm:ss	6:00	6:00		



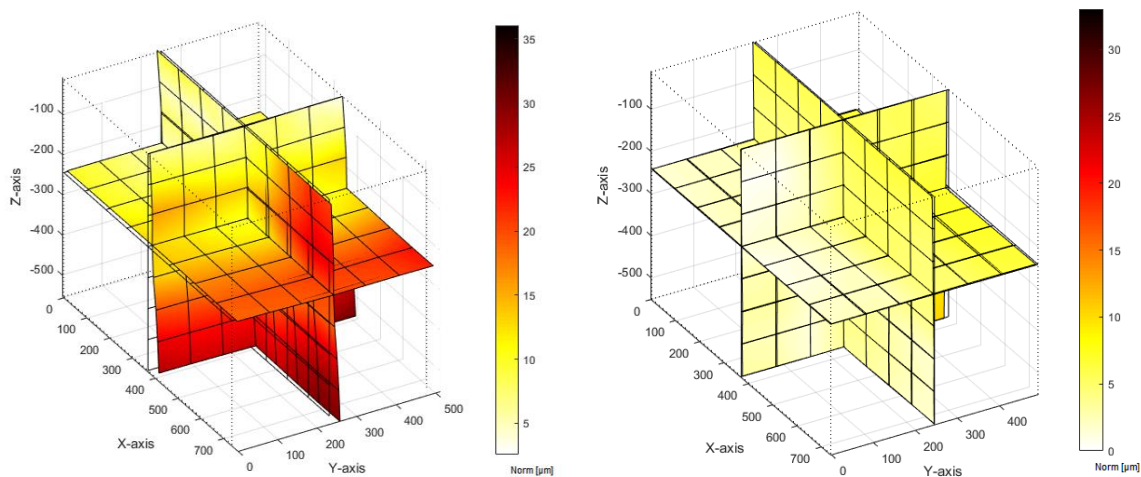
Obr. 81 Graficky zobrazené hodnoty měření č. 7

Na obrázku 82 jsou zobrazeny průběhy teplot os obráběcího stroje. Do bodu 8 jsou teploty zaznamenávány pro kalibrační měření a za tímto bodem teploty pro verifikační měření. Z obrázku je patrné, že u obou měření se stroj trochu zahřívá. U verifikačního měření se teploty změnily o 0,8 °C. Nejvíce zahřátá osa stroje byla osa X (25,2 °C).



Obr. 82 Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 7

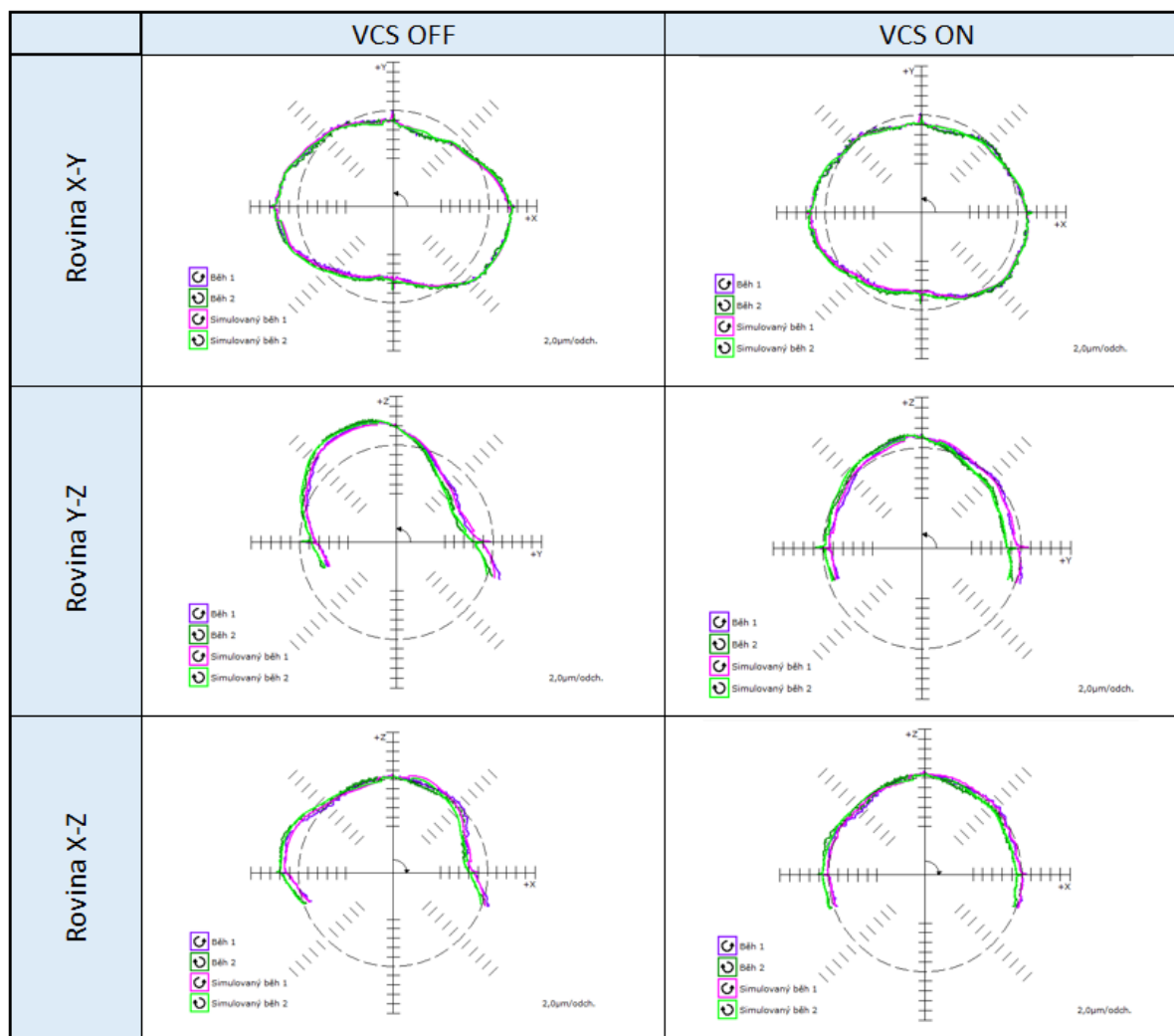
Software TRAC-CAL umožňuje vykreslit základní zobrazení volumetrických odchylek v kontrolovaném prostoru. Toto zobrazení je na obrázku 83. V levé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při kalibračním měření, tedy v původním stavu stroje bez zapnutých kompenzací. Výsledná volumetrická chyba je 33 μm. V pravé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při verifikačním měření, tedy ve stavu stroje, kdy má aktivovanou volumetrickou kompenzaci. Výsledná volumetrická chyba je 11 μm. Z obrázků 83a,b je na první pohled patrné, že se volumetrická chyba zmenšila.



Obr 83. Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 7

a) před kompenzací b) po kompenzací

Na obrázku 84 jsou zobrazeny výsledky měření zkoušky kruhové interpolace pomocí zařízení Ballbar QC20-W. Z obrázku 84 je patrné zlepšení ve všech třech rovinách. Například v rovině X-Y se kruhovitost zlepšila z 11,2 µm na 8,0 µm.



Obr. 84 Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 7



## Příloha 7: Měření č. 8

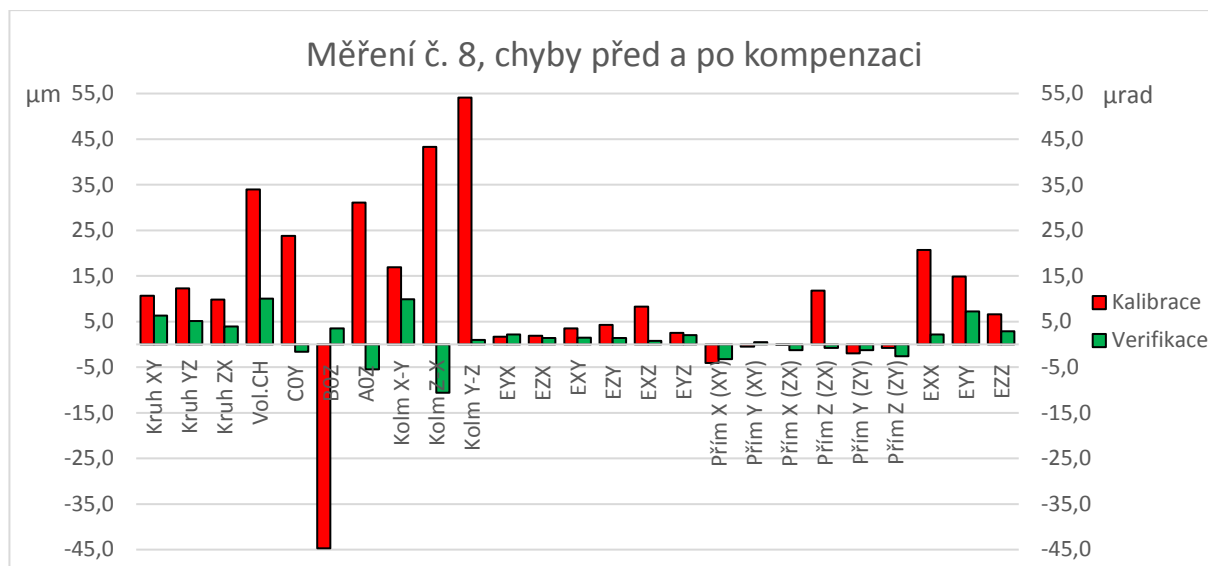
Měření č. 8 se uskutečnilo 1.4.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS2 se stabilitou laseru 5 nm a s počtem interpolačních bodů 11. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

V tabulce 20 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Zeleně jsou označeny ty hodnoty, které se zlepšily alespoň o 50 % po kompenzaci a naopak červeně jsou označeny hodnoty, které se zhoršily (zde už nezáleží o kolik procent). Světlé modré označené typy chyb jsou změřeny pomocí přístroje LaserTRACER a žlutě označené typy chyb jsou naměřeny pomocí přístroje Ballbar QC20-W. Z tabulky jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU a pomocí ballbaru a to až o 53,10  $\mu\text{m}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 1,8  $\mu\text{m}$ .

Na obrázku 85 jsou znázorněny tyto chyby graficky.

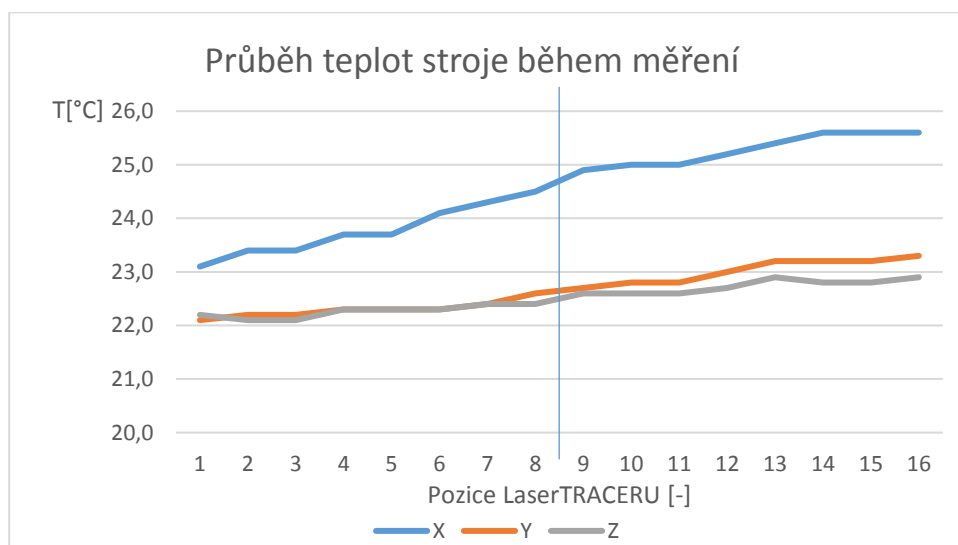
Tab 20) Naměřené hodnoty měření č. 8 před a po kompenzaci

			Kalibrace	Verifikace	Rozdíl	
					Absolutní	Relativní
kruhovitost	Kruhovitost v rovině X-Y	μm	10,7	6,3	4,40	41,1%
	Kruhovitost v rovině Y-Z	μm	12,3	5,1	7,20	58,5%
	Kruhovitost v rovině Z-X	μm	9,8	3,9	5,90	60,2%
VCS	Volumetrická odchylka	μm	34,0	10,0	24,00	70,6%
kolmost	Kolmost v rovině X-Y	μrad	23,8	-1,6	22,20	93,3%
	Kolmost v rovině Z-X	μrad	-44,7	3,5	41,20	92,2%
	Kolmost v rovině Y-Z	μrad	31,1	-5,5	25,60	82,3%
	Kolmost v rovině X-Y	μm/m	16,9	9,9	7,00	41,4%
	Kolmost v rovině Z-X	μm/m	43,3	-10,6	32,70	75,5%
	Kolmost v rovině Y-Z	μm/m	54,1	1,0	53,10	98,2%
přímost	Odchylka přímosti Y ve směru osy X	μm	1,7	2,2	-0,50	-29,4%
	Odchylka přímosti Z ve směru osy X	μm	1,9	1,4	0,50	26,3%
	Odchylka přímosti X ve směru osy Y	μm	3,5	1,5	2,00	57,1%
	Odchylka přímosti Z ve směru osy Y	μm	4,3	1,4	2,90	67,4%
	Odchylka přímosti X ve směru osy Z	μm	8,3	0,8	7,50	90,4%
	Odchylka přímosti Y ve směru osy Z	μm	2,5	2,0	0,50	20,0%
	Přímochařost X (Rovina XY)	μm	-4,1	-3,2	0,90	22,0%
	Přímochařost Y (Rovina XY)	μm	-0,5	0,5	0,00	0,0%
	Přímochařost X (Rovina ZX)	μm	-0,1	-1,3	-1,20	-1200,0%
	Přímochařost Z (Rovina ZX)	μm	11,8	-0,8	11,00	93,2%
	Přímochařost Y (Rovina ZY)	μm	-2,0	-1,3	0,70	35,0%
	Přímochařost Z (Rovina ZY)	μm	-0,8	-2,6	-1,80	-225,0%
poloha	Přesnost najetí do polohy v ose X	μm	20,7	2,2	18,50	89,4%
	Přesnost najetí do polohy v ose Y	μm	14,9	7,2	7,70	51,7%
	Přesnost najetí do polohy v ose Z	μm	6,6	2,9	3,70	56,1%
čas	Mapování 1 pozice LTc	mm:ss	9:30	9:30		



Obr. 85 Graficky zobrazené hodnoty měření č. 8

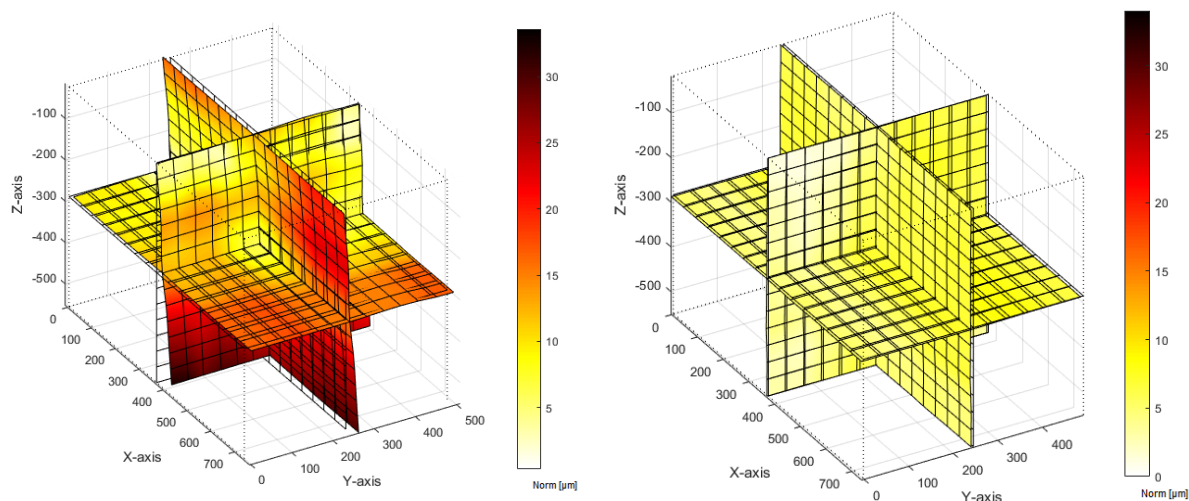
Na obrázku 86 jsou zobrazeny průběhy teplot os obráběcího stroje. Do bodu 8 jsou teploty zaznamenávány pro kalibrační měření a za tímto bodem teploty pro verifikační měření. Z obrázku je patrné, že při kalibračním měření se stroj trochu zahřívá, a naopak u verifikačního měření jsou teploty os ustálené. U verifikačního měření se teploty změnily o 0,7 °C. Nejvíce zahřátá osa stroje byla osa X (25,6 °C).



Obr. 86 Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 8

Software TRAC-CAL umožňuje vykreslit základní zobrazení volumetrických odchylek v kontrolovaném prostoru. Toto zobrazení je na obrázku 87. V levé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při kalibračním měření, tedy v původním stavu stroje bez zapnutých kompenzací. Výsledná volumetrická chyba je 34,0 μm. V pravé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při verifikačním měření, tedy ve stavu stroje, kdy má aktivovanou volumetrickou kompenzaci. Výsledná volumetrická chyba je 10,0 μm. Z obrázků 87a,b je na první pohled patrné, že se volumetrická chyba zmenšila.

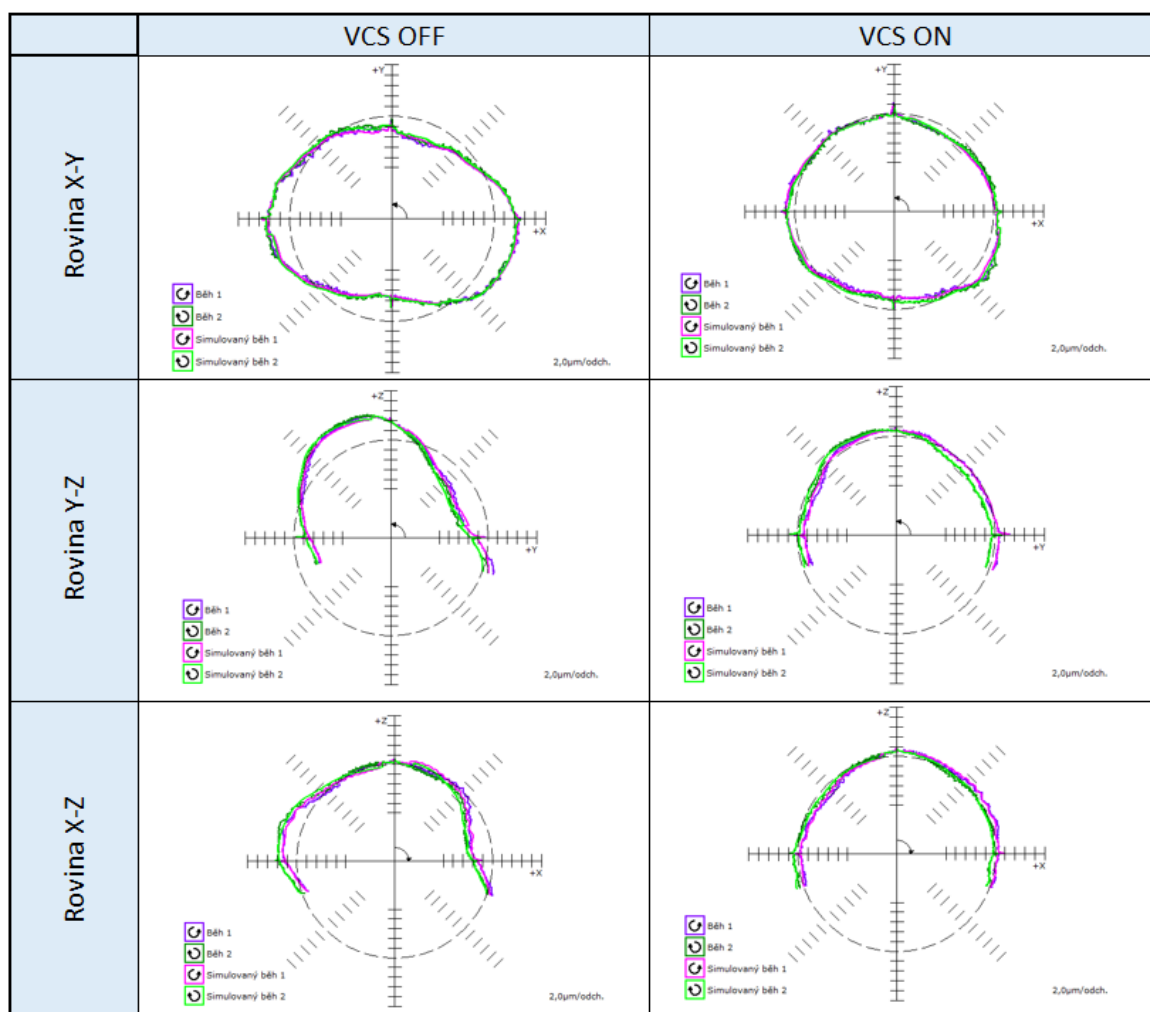




Obr. 87 Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 8

a) před kompenzací b) po kompenzací

Na obrázku 88 jsou zobrazeny výsledky měření zkoušky kruhové interpolace pomocí zařízení Ballbar QC20-W. Z obrázku 88 je patrné zlepšení ve všech třech rovinách. Například v rovině X-Y se kruhovitost zlepšila z 10,7 μm na 6,3 μm.



Obr. 88 Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 8

## Příloha 8: Měření č. 9

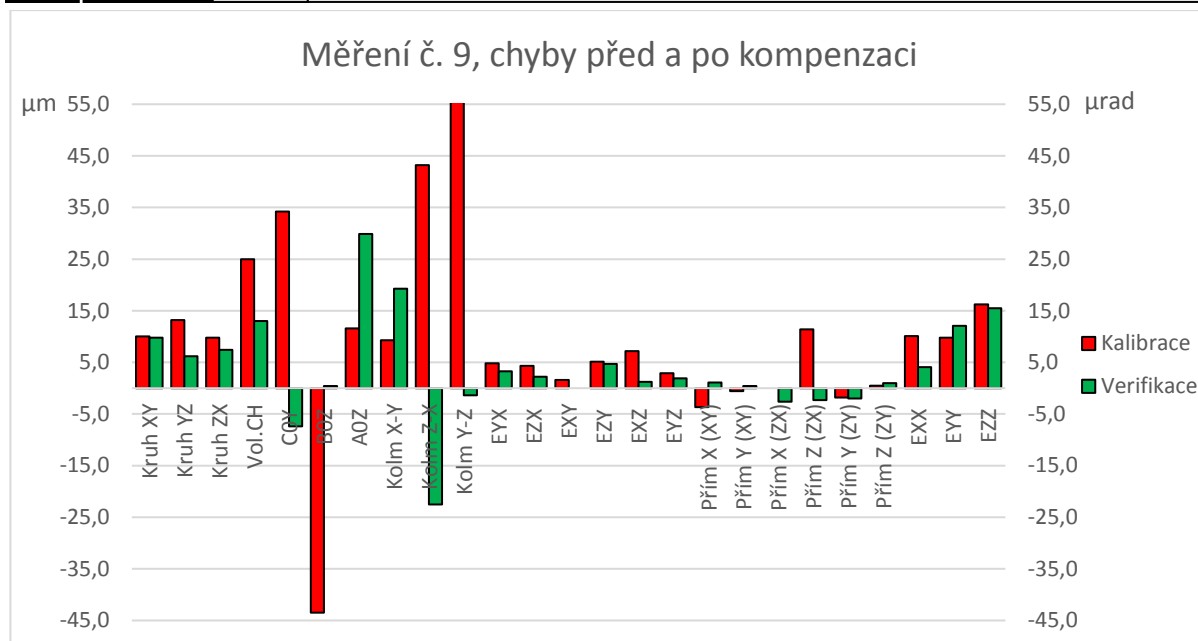
Měření č. 9 se uskutečnilo 4.3.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS3 se stabilitou laseru 3 nm a s počtem interpolačních bodů 6. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

V tabulce 21 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Zeleně jsou označeny ty hodnoty, které se zlepšily alespoň o 50 % po kompenzaci a naopak červeně jsou označeny hodnoty, které se zhoršily (zde už nezáleží o kolik procent). Světlé modré označené typy chyb jsou změřeny pomocí přístroje LaserTRACER a žlutě označené typy chyb jsou naměřeny pomocí přístroje Ballbar QC20-W. Z tabulky jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily určité chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU a pomocí ballbaru a to až o 55,5  $\mu\text{m}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 2,6  $\mu\text{m}$ .

Na obrázku 89 jsou znázorněny tyto chyby graficky.

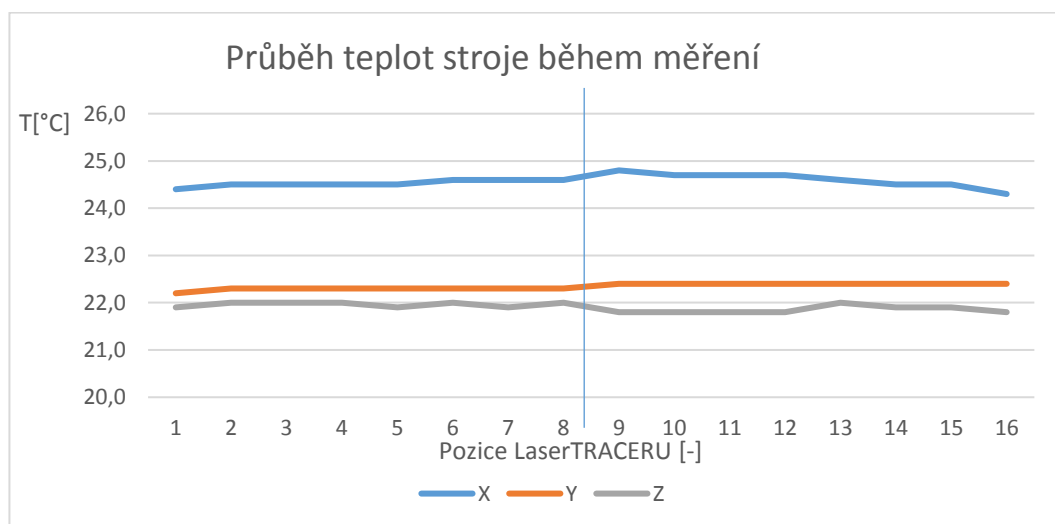
Tab 21) Naměřené hodnoty měření č. 9 před a po kompenzaci

			Kalibrace	Verifikace	Rozdíl	
					Absolutní	Relativní
kruhovitost	Kruhovitost v rovině X-Y	μm	10,0	9,8	0,20	2,0%
	Kruhovitost v rovině Y-Z	μm	13,2	6,2	7,00	53,0%
	Kruhovitost v rovině Z-X	μm	9,8	7,4	2,40	24,5%
VCS	Volumetrická odchylka	μm	25,0	13,0	12,00	48,0%
kolmost	Kolmost v rovině X-Y	μrad	34,2	-7,4	26,80	78,4%
	Kolmost v rovině Z-X	μrad	-43,5	0,4	43,10	99,1%
	Kolmost v rovině Y-Z	μrad	11,6	29,9	-18,30	-157,8%
	Kolmost v rovině X-Y	μm/m	9,3	19,3	-10,00	-107,5%
	Kolmost v rovině Z-X	μm/m	43,2	-22,5	20,70	47,9%
	Kolmost v rovině Y-Z	μm/m	56,9	-1,4	55,50	97,5%
přímost	Odchylka přímosti Y ve směru osy X	μm	4,8	3,3	1,50	31,3%
	Odchylka přímosti Z ve směru osy X	μm	4,3	2,2	2,10	48,8%
	Odchylka přímosti X ve směru osy Y	μm	1,6	0,0	1,60	100,0%
	Odchylka přímosti Z ve směru osy Y	μm	5,1	4,7	0,40	7,8%
	Odchylka přímosti X ve směru osy Z	μm	7,2	1,2	6,00	83,3%
	Odchylka přímosti Y ve směru osy Z	μm	2,9	1,9	1,00	34,5%
	Přímočarost X (Rovina XY)	μm	-3,7	1,1	2,60	70,3%
	Přímočarost Y (Rovina XY)	μm	-0,6	0,4	0,20	33,3%
	Přímočarost X (Rovina ZX)	μm	0,0	-2,6	-2,60	-260,0%
	Přímočarost Z (Rovina ZX)	μm	11,4	-2,3	9,10	79,8%
	Přímočarost Y (Rovina ZY)	μm	-1,8	-2,0	-0,20	-11,1%
	Přímočarost Z (Rovina ZY)	μm	0,5	1,0	-0,50	-100,0%
poloha	Přesnost najetí do polohy v ose X	μm	10,1	4,1	6,00	59,4%
	Přesnost najetí do polohy v ose Y	μm	9,8	12,1	-2,30	-23,5%
	Přesnost najetí do polohy v ose Z	μm	16,2	15,5	0,70	4,3%
čas	Mapování 1 pozice LTc	mm:ss	6:00	6:00		



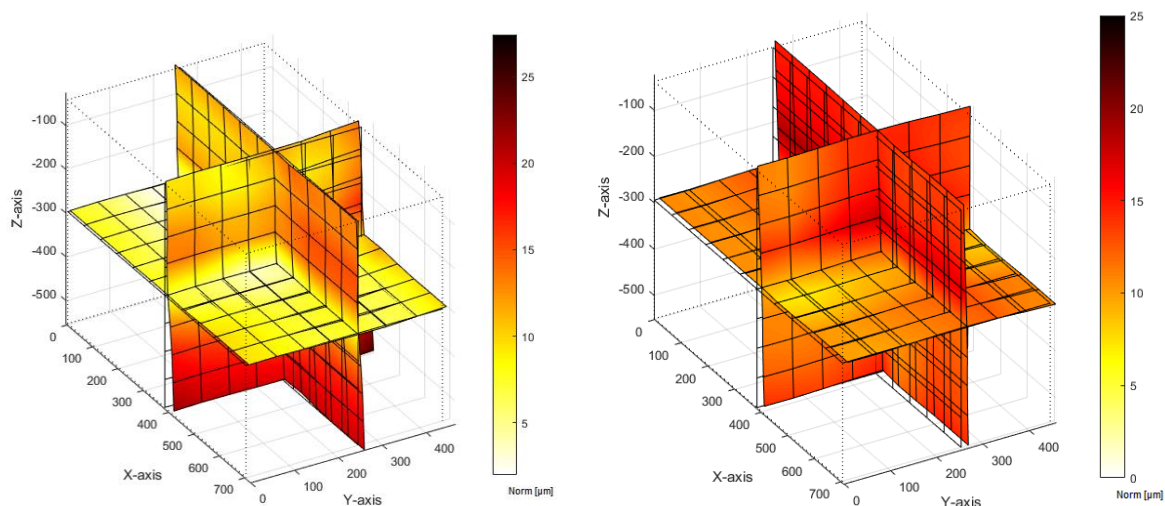
Obr. 89 Graficky zobrazené hodnoty měření č. 9

Na obrázku 90 jsou zobrazeny průběhy teplot os obráběcího stroje. Do bodu 8 jsou teploty zaznamenávány pro kalibrační měření a za tímto bodem teploty pro verifikační měření. Z obrázku je patrné, že u obou měření jsou teploty os ustálené. U verifikačního měření se teploty změnily o 0,5 °C. Nejvíce zahřátá osa stroje byla osa X (24,8 °C).



Obr. 90 Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 9

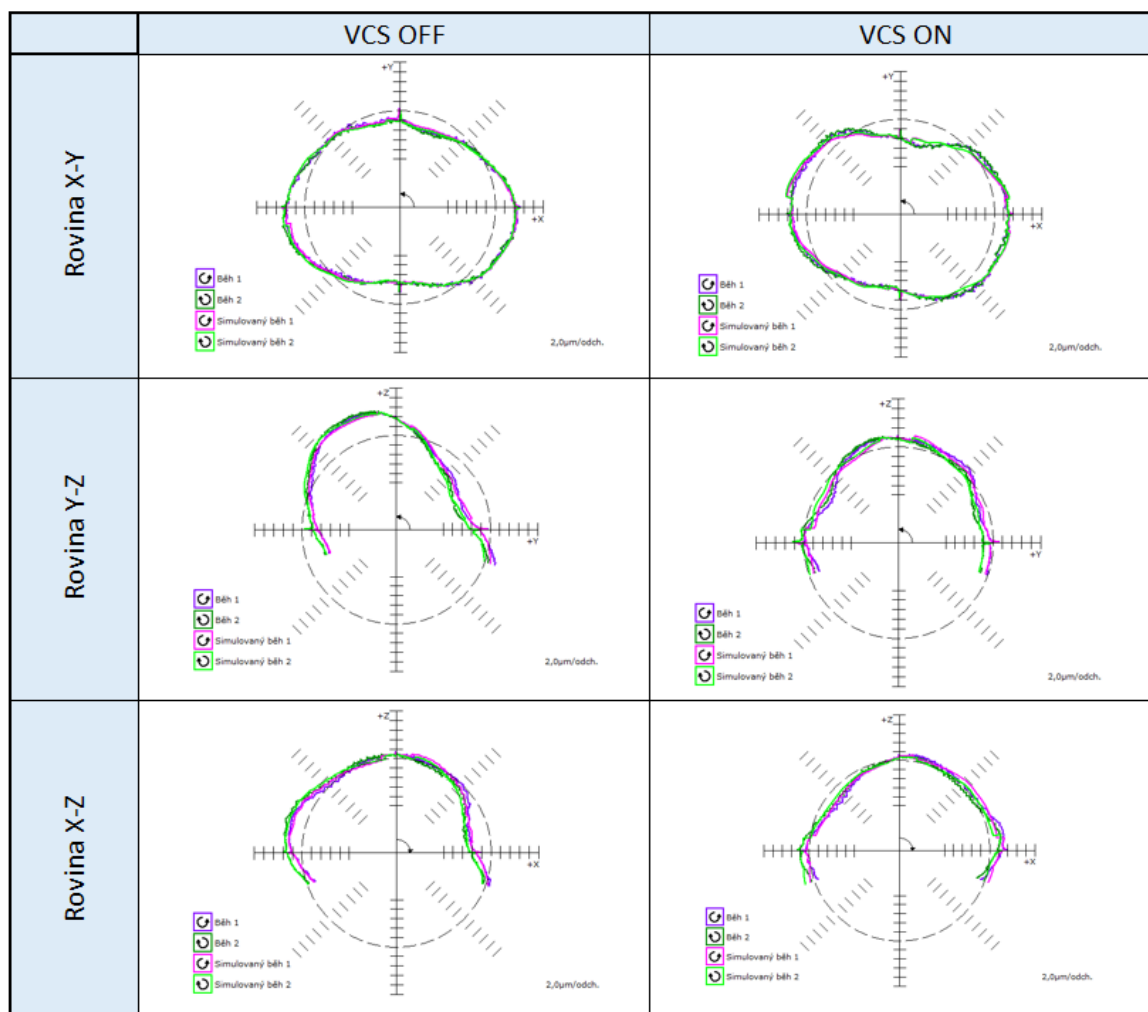
Software TRAC-CAL umožňuje vykreslit základní zobrazení volumetrických odchylek v kontrolovaném prostoru. Toto zobrazení je na obrázku 91. V levé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při kalibračním měření, tedy v původním stavu stroje bez zapnutých kompenzací. Výsledná volumetrická chyba je 25,0 μm. V pravé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při verifikačním měření, tedy ve stavu stroje, kdy má aktivovanou volumetrickou kompenzaci. Výsledná volumetrická chyba je 13,0 μm. Z obrázků 91a,b je na první pohled, že se volumetrická chyba ve spodní části zmenšila a naopak ve vrchní části o trochu zvětšila.



Obr. 91 Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 9

a) před kompenzací b) po kompenzací

Na obrázku 92 jsou zobrazeny výsledky měření zkoušky kruhové interpolace pomocí zařízení Ballbar QC20-W. Z obrázku 92 je patrné zlepšení ve všech třech rovinách. Například v rovině X-Y se kruhovitost zlepšila z 10,0 μm na 9,8 μm.



Obr. 92 Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 9

## Příloha 9: Měření č. 10

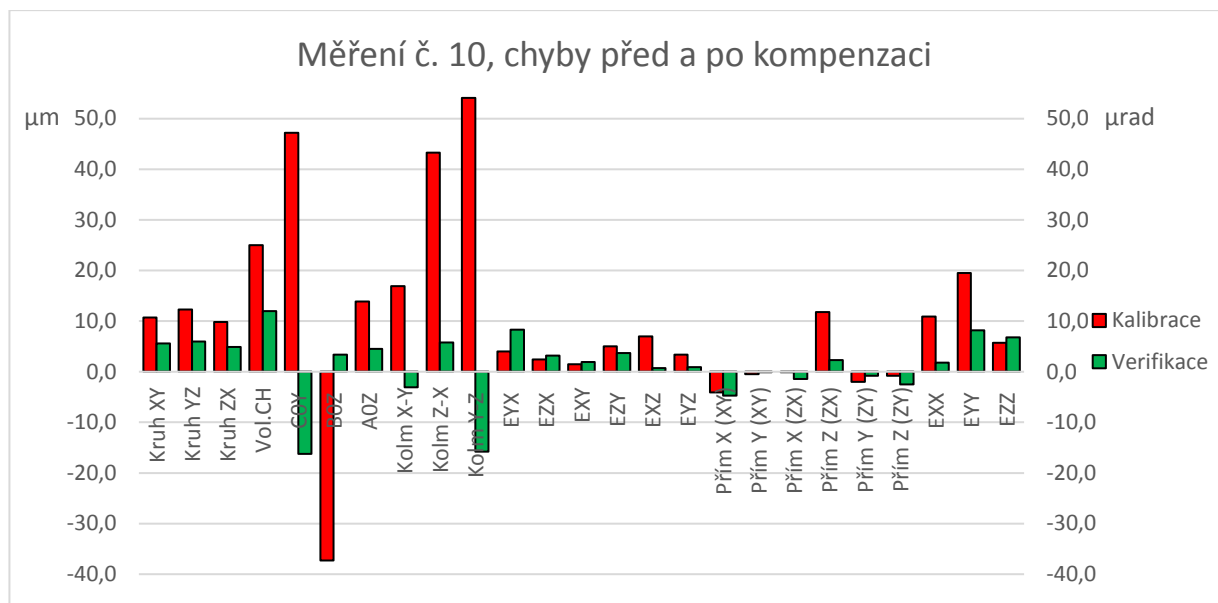
Měření č. 10 se uskutečnilo 28.2.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS3 se stabilitou laseru 3 nm a s počtem interpolačních bodů 11. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

V tabulce 22 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Zeleně jsou označeny ty hodnoty, které se zlepšily alespoň o 50 % po kompenzaci a naopak červeně jsou označeny hodnoty, které se zhoršily (zde už nezáleží o kolik procent). Světlé modré označené typy chyb jsou změřeny pomocí přístroje LaserTRACER a žlutě označené typy chyb jsou naměřeny pomocí přístroje Ballbar QC20-W. Z tabulky jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU a pomocí ballbaru a to až o 44,0  $\mu\text{m}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 2,8  $\mu\text{m}$ .

Na obrázku 93 jsou znázorněny tyto chyby graficky.

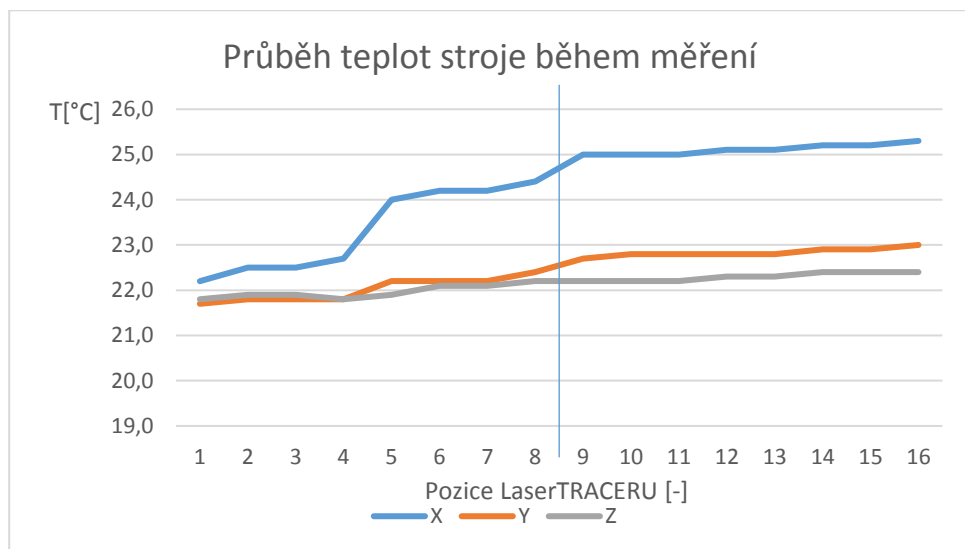
Tab 22) Naměřené hodnoty měření č. 10 před a po kompenzaci

			Kalibrace	Verifikace	Rozdíl	
					Absolutní	Relativní
kruhovitost	Kruhovitost v rovině X-Y	μm	11,2	6,3	4,90	43,8%
	Kruhovitost v rovině Y-Z	μm	13,1	4,7	8,40	64,1%
	Kruhovitost v rovině Z-X	μm	9,7	4,5	5,20	53,6%
VCS	Volumetrická odchylka	μm	35,0	11,0	24,00	68,6%
kolmost	C0Y Kolmost v rovině X-Y	μrad	19,7	-1,1	18,60	94,4%
	B0Z Kolmost v rovině Z-X	μrad	-49,6	5,1	44,50	89,7%
	A0Z Kolmost v rovině Y-Z	μrad	27,2	-4,5	22,70	83,5%
	Kolmost v rovině X-Y	μm/m	18,6	17,5	1,10	5,9%
	Kolmost v rovině Z-X	μm/m	41,3	2,9	38,40	93,0%
	Kolmost v rovině Y-Z	μm/m	60,7	0,9	59,80	98,5%
přímost	EYX Odchylka přímosti Y ve směru osy	μm	4,5	2,8	1,70	37,8%
	EZX Odchylka přímosti Z ve směru osy	μm	1,8	2,5	-0,70	-38,9%
	EXY Odchylka přímosti X ve směru osy	μm	2,3	1,6	0,70	30,4%
	EZY Odchylka přímosti Z ve směru osy	μm	4,0	1,2	2,80	70,0%
	EXZ Odchylka přímosti X ve směru osy	μm	8,6	1,1	7,50	87,2%
	EYZ Odchylka přímosti Y ve směru osy	μm	2,8	1,4	1,40	50,0%
	Přímočarost X (Rovina XY)	μm	-3,8	-2,7	1,10	28,9%
	Přímočarost Y (Rovina XY)	μm	0,0	1,5	-1,50	-150,0%
	Přímočarost X (Rovina ZX)	μm	0,3	-1,0	-0,70	-233,3%
	Přímočarost Z (Rovina ZX)	μm	11,3	2,3	9,00	79,6%
	Přímočarost Y (Rovina ZY)	μm	-1,9	-0,3	1,60	84,2%
	Přímočarost Z (Rovina ZY)	μm	0,1	0,4	-0,30	-300,0%
poloha	EXX Přesnost najetí do polohy v ose X	μm	21,8	2,1	19,70	90,4%
	EYY Přesnost najetí do polohy v ose Y	μm	10,4	6,1	4,30	41,3%
	EZZ Přesnost najetí do polohy v ose Z	μm	6,1	5,5	0,60	9,8%
čas	Mapování 1 pozice LTc	mm:ss	6:00	6:00		



Obr. 93 Graficky zobrazené hodnoty měření č. 10

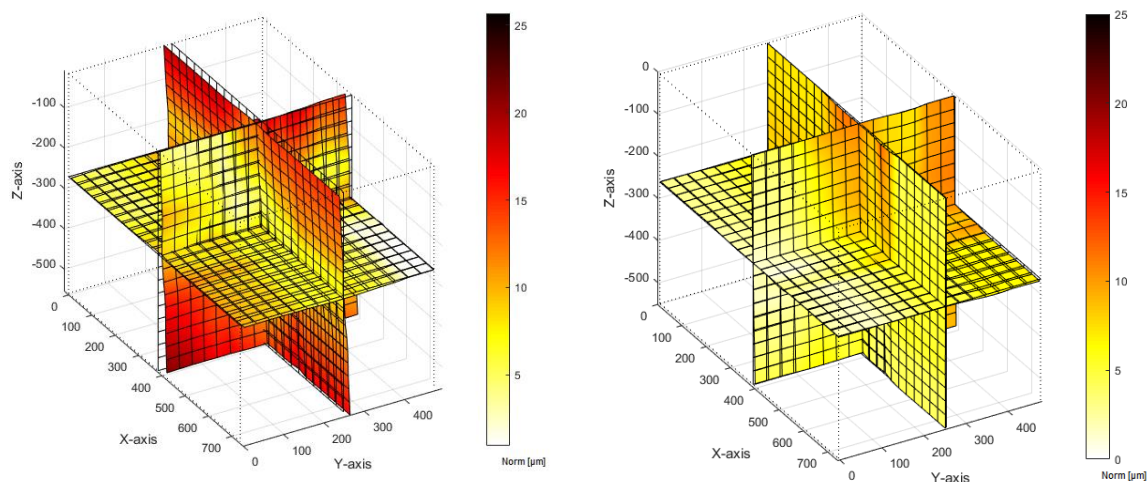
Na obrázku 94 jsou zobrazeny průběhy teplot os obráběcího stroje. Do bodu 8 jsou teploty zaznamenávány pro kalibrační měření a za tímto bodem teploty pro verifikační měření. Z obrázku je patrné, že při kalibračním měření se stroj trochu zahřívá, a naopak u verifikačního měření jsou teploty os ustálené. U verifikačního měření se teploty změnily o 0,4 °C. Nejvíce zahřátá osa stroje byla osa X (26,3 °C).



Obr. 94 Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 10

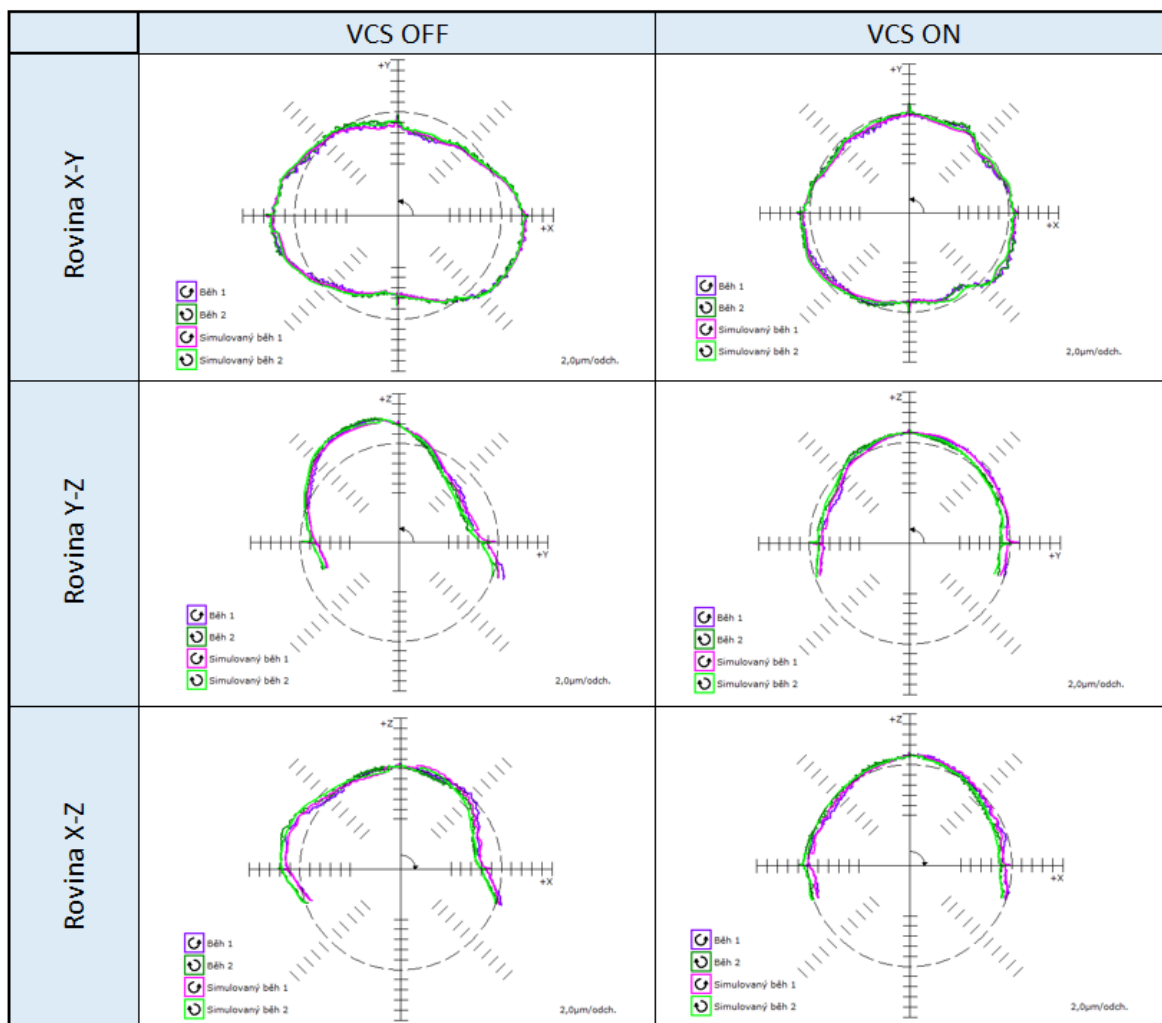
Software TRAC-CAL umožňuje vykreslit základní zobrazení volumetrických odchylek v kontrolovaném prostoru. Toto zobrazení je na obrázku 95. V levé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při kalibračním měření, tedy v původním stavu stroje bez zapnutých kompenzací. Výsledná volumetrická chyba je 28 μm. V pravé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při verifikačním měření, tedy ve stavu stroje, kdy má aktivovanou volumetrickou kompenzaci. Výsledná volumetrická chyba je 14 μm. Z obrázků 95a,b je na první pohled patrné, že se volumetrická chyba zmenšila.





Obr. 95 Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 10  
a) před kompenzací b) po kompenzací

Na obrázku 96 jsou zobrazeny výsledky měření zkoušky kruhové interpolace pomocí zařízení Ballbar QC20-W. Z obrázku 96 je patrné zlepšení ve všech třech rovinách. Například v rovině X-Y se kruhovitost zlepšila z 10,0 μm na 5,7 μm.



Obr. 96 Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 10

## Příloha 10: Měření č. 11

Měření č. 11 se uskutečnilo 4.3.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS3 se stabilitou laseru 5 nm a s počtem interpolačních bodů 6. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

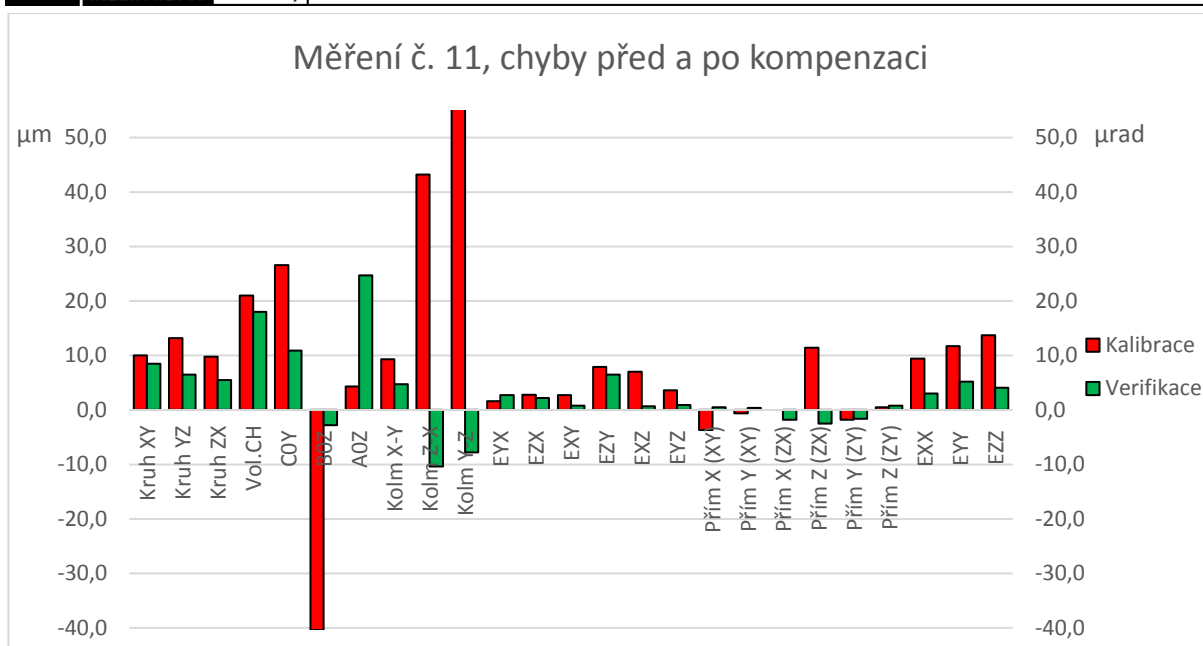
V tabulce 23 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Zeleně jsou označeny ty hodnoty, které se zlepšily alespoň o 50 % po kompenzaci a naopak červeně jsou označeny hodnoty, které se zhoršily (zde už nezáleží o kolik procent). Světlé modré označené typy chyb jsou změřeny pomocí přístroje LaserTRACER a žlutě označené typy chyb jsou naměřeny pomocí přístroje Ballbar QC20-W. Z tabulky jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí ballbaru a to až o 49,1  $\mu\text{m}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 1,8  $\mu\text{m}$ .

Na obrázku 97 jsou znázorněny tyto chyby graficky.

Tab 23) Naměřené hodnoty měření č. 11 před a po kompenzaci

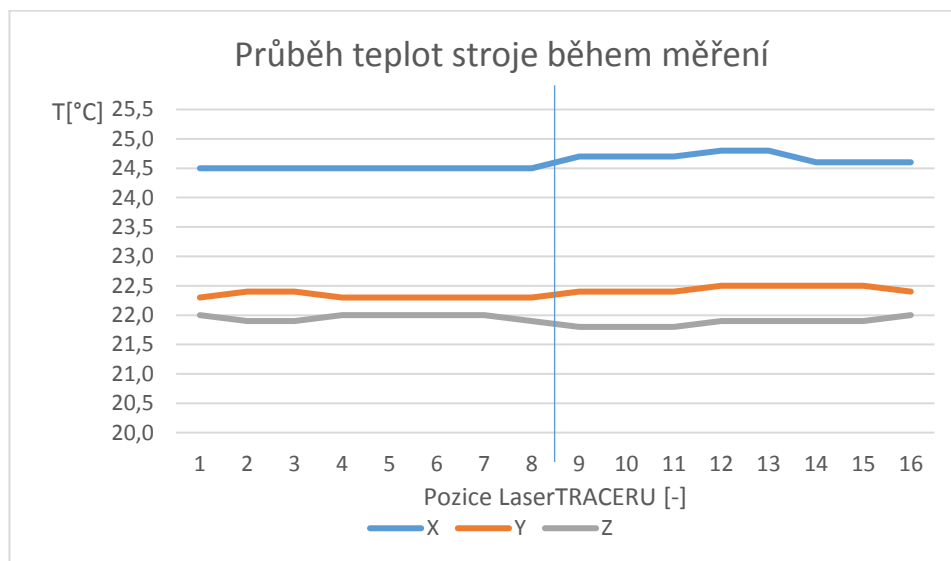
			Kalibrace	Verifikace	Rozdíl	
					Absolutní	Relativní
kruhovitost	Kruhovitost v rovině X-Y	μm	10,0	8,5	1,50	15,0%
	Kruhovitost v rovině Y-Z	μm	13,2	6,5	6,70	50,8%
	Kruhovitost v rovině Z-X	μm	9,8	5,5	4,30	43,9%
VCS	Volumetrická odchylka	μm	21,0	18,0	3,00	14,3%
kolmost	Kolmost v rovině X-Y	μrad	26,6	10,9	15,70	59,0%
	Kolmost v rovině Z-X	μrad	-40,4	-2,8	37,60	93,1%
	Kolmost v rovině Y-Z	μrad	4,3	24,7	-20,40	-474,4%
	Kolmost v rovině X-Y	μm/m	9,3	4,7	4,60	49,5%
	Kolmost v rovině Z-X	μm/m	43,2	-10,4	32,80	75,9%
	Kolmost v rovině Y-Z	μm/m	56,9	-7,8	49,10	86,3%
přímost	Odchylka přímosti Y ve směru osy X	μm	1,6	2,7	-1,10	-68,8%
	Odchylka přímosti Z ve směru osy X	μm	2,8	2,2	0,60	21,4%
	Odchylka přímosti X ve směru osy Y	μm	2,7	0,8	1,90	70,4%
	Odchylka přímosti Z ve směru osy Y	μm	7,9	6,5	1,40	17,7%
	Odchylka přímosti X ve směru osy Z	μm	7,0	0,7	6,30	90,0%
	Odchylka přímosti Y ve směru osy Z	μm	3,6	0,9	2,70	75,0%
	Přímočarost X (Rovina XY)	μm	-3,7	0,5	3,20	86,5%
	Přímočarost Y (Rovina XY)	μm	-0,6	0,4	0,20	33,3%
	Přímočarost X (Rovina ZX)	μm	0,0	-1,8	-1,80	-180,0%
	Přímočarost Z (Rovina ZX)	μm	11,4	-2,5	8,90	78,1%
	Přímočarost Y (Rovina ZY)	μm	-1,8	-1,6	0,20	11,1%
	Přímočarost Z (Rovina ZY)	μm	0,5	0,8	-0,30	-60,0%
poloha	EXX Přesnost najetí do polohy v ose X	μm	9,4	3,0	6,40	68,1%
	EYY Přesnost najetí do polohy v ose Y	μm	11,7	5,2	6,50	55,6%
	EZZ Přesnost najetí do polohy v ose Z	μm	13,7	4,1	9,60	70,1%
čas	Mapování 1 pozice LTc	mm:ss	6:00	6:00		





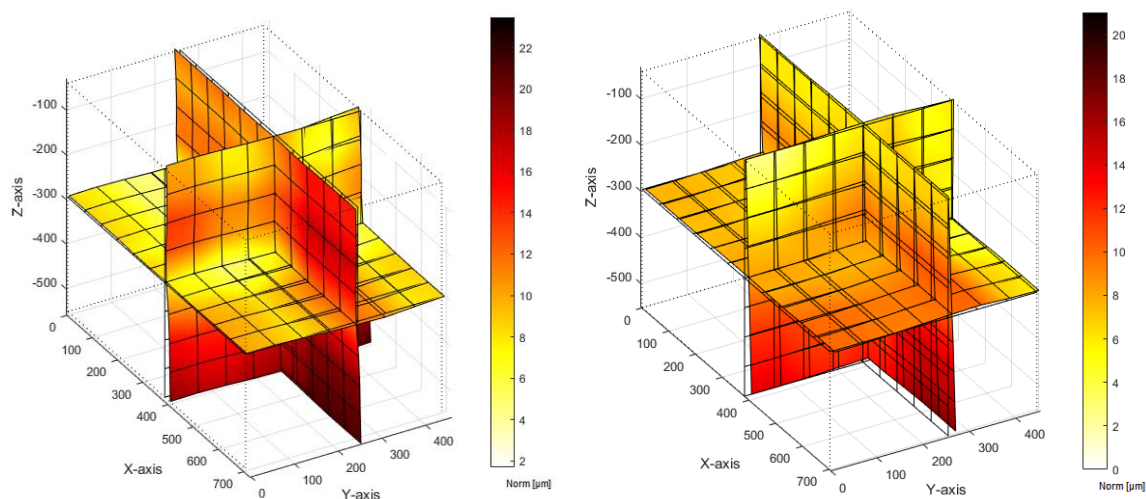
Obr. 97 Graficky zobrazené hodnoty měření č. 11

Na obrázku 98 jsou zobrazeny průběhy teplot os obráběcího stroje. Do bodu 8 jsou teploty zaznamenávány pro kalibrační měření a za tímto bodem teploty pro verifikační měření. Z obrázku je patrné, že u obou měření jsou teploty os ustálené. U verifikačního měření se teploty změnily o 0,2 °C. Nejvíce zahřátá osa stroje byla osa X (24,8 °C).



Obr. 98 Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 11

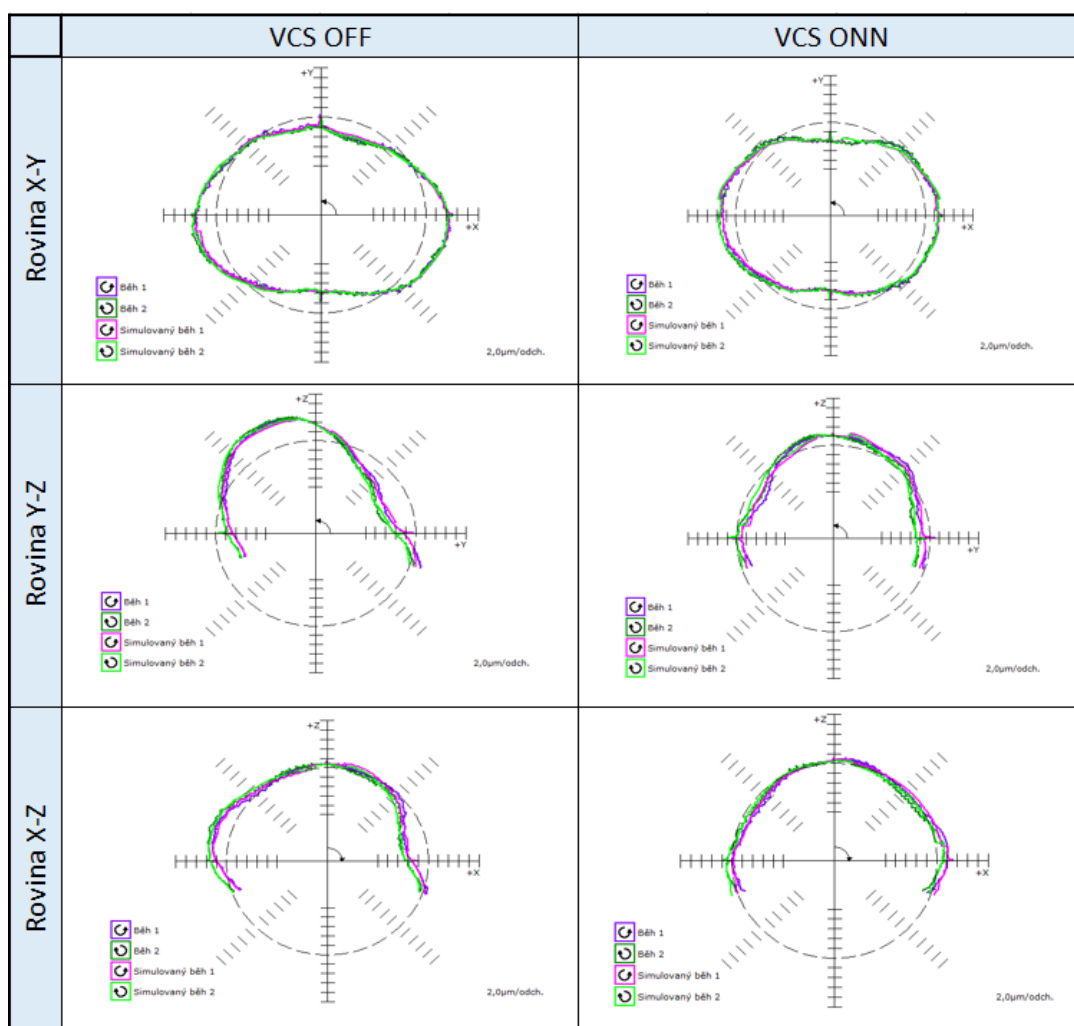
Software TRAC-CAL umožňuje vykreslit základní zobrazení volumetrických odchylek v kontrolovaném prostoru. Toto zobrazení je na obrázku 99. V levé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při kalibračním měření, tedy v původním stavu stroje bez zapnutých kompenzací. Výsledná volumetrická chyba je 21 μm. V pravé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při verifikačním měření, tedy ve stavu stroje, kdy má aktivovanou volumetrickou kompenzaci. Výsledná volumetrická chyba je 18 μm. Z obrázků 99a,b je na první pohled patrné, že se volumetrická chyba zmenšila.



Obr. 99 Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 11

a) před kompenzací b) po kompenzací

Na obrázku 100 jsou zobrazeny výsledky měření zkoušky kruhové interpolace pomocí zařízení Ballbar QC20-W. Z obrázku 100 je patrné zlepšení ve všech třech rovinách. Například v rovině X-Y se kruhovitost zlepšila z 10,0 μm na 8,5 μm.



Obr. 100 Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 11

## Příloha 11: Měření č. 12

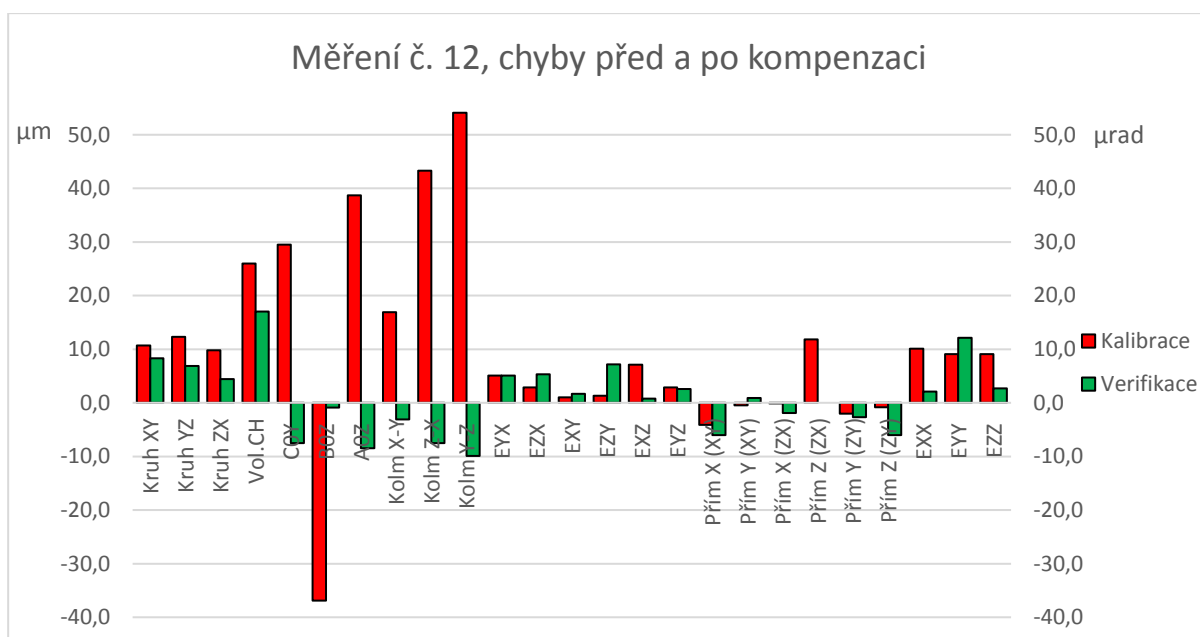
Měření č. 12 se uskutečnilo 25.3.2019 v laboratoři C1/118. Měřil se největší prostor WS3 se stabilitou laseru 5 nm a s počtem interpolačních bodů 11. Postup měření je blíže popsán v kapitole 6.2.

V tabulce 24 jsou zobrazeny změřené hodnoty. Zeleně jsou označeny ty hodnoty, které se zlepšily alespoň o 50 % po kompenzaci a naopak červeně jsou označeny hodnoty, které se zhoršily (zde už nezáleží o kolik procent). Světlé modré označené typy chyb jsou změřeny pomocí přístroje LaserTRACER a žlutě označené typy chyb jsou naměřeny pomocí přístroje Ballbar QC20-W. Z tabulky jsou patrné rozdíly jednotlivých chyb. Téměř u všech chyb se dosáhlo zlepšení. Nejvíce se zlepšily chyby kolmosti změřené pomocí LaserTRACERU a pomocí ballbaru a to až o 44,2  $\mu\text{m}$ . Naopak u chyb přímosti došlo k nepatrnému zhoršení až o 5,9  $\mu\text{m}$ .

Na obrázku 101 jsou znázorněny tyto chyby graficky.

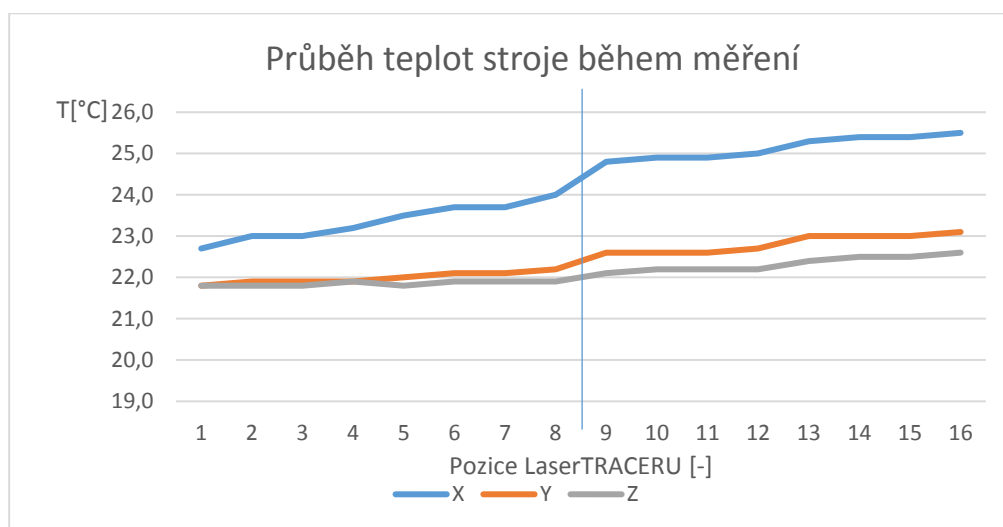
Tab 24) Naměřené hodnoty měření č. 12 před a po kompenzaci

			Kalibrace	Verifikace	Rozdíl	
					Absolutní	Relativní
kruhovitost	Kruhovitost v rovině X-Y	μm	10,7	8,3	2,40	22,4%
	Kruhovitost v rovině Y-Z	μm	12,3	6,9	5,40	43,9%
	Kruhovitost v rovině Z-X	μm	9,8	4,4	5,40	55,1%
VCS	Volumetrická odchylna	μm	26,0	17,0	9,00	34,6%
kolmost	Kolmost v rovině X-Y	μrad	29,5	-7,5	22,00	74,6%
	Kolmost v rovině Z-X	μrad	-36,9	-0,9	36,00	97,6%
	Kolmost v rovině Y-Z	μrad	38,7	-8,5	30,20	78,0%
	Kolmost v rovině X-Y	μm/m	16,9	-3,1	13,80	81,7%
	Kolmost v rovině Z-X	μm/m	43,3	-7,5	35,80	82,7%
	Kolmost v rovině Y-Z	μm/m	54,1	-9,9	44,20	81,7%
přímota	Odchylna přímota Y ve směru osy X	μm	5,1	5,1	0,00	0,0%
	Odchylna přímota Z ve směru osy X	μm	2,9	5,3	-2,40	-82,8%
	Odchylna přímota X ve směru osy Y	μm	1,0	1,7	-0,70	-70,0%
	Odchylna přímota Z ve směru osy Y	μm	1,3	7,2	-5,90	-453,8%
	Odchylna přímota X ve směru osy Z	μm	7,1	0,8	6,30	88,7%
	Odchylna přímota Y ve směru osy Z	μm	2,9	2,6	0,30	10,3%
	Přímotařarost X (Rovina XY)	μm	-4,1	-6,0	-1,90	-46,3%
	Přímotařarost Y (Rovina XY)	μm	-0,5	0,9	-0,40	-80,0%
	Přímotařarost X (Rovina ZX)	μm	-0,1	-1,9	-1,80	-1800,0%
	Přímotařarost Z (Rovina ZX)	μm	11,8	0,0	11,80	100,0%
	Přímotařarost Y (Rovina ZY)	μm	-2,0	-2,7	-0,70	-35,0%
	Přímotařarost Z (Rovina ZY)	μm	-0,8	-6,0	-5,20	-650,0%
poloha	Přesnost najetí do polohy v ose X	μm	10,1	2,1	8,00	79,2%
	Přesnost najetí do polohy v ose Y	μm	9,1	12,1	-3,00	-33,0%
	Přesnost najetí do polohy v ose Z	μm	9,1	2,7	6,40	70,3%
čas	Mapování 1 pozice LTc	mm:ss	8:50	8:50		



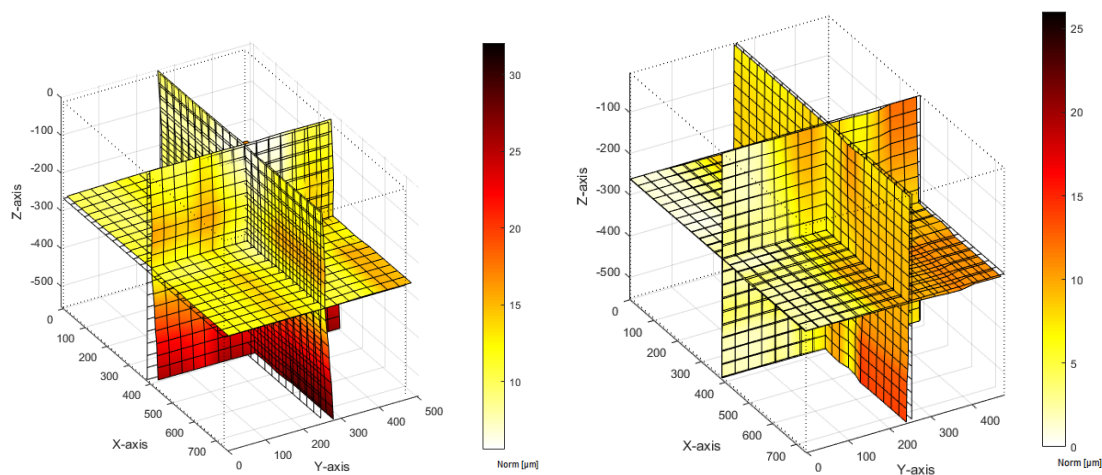
Obr. 101 Graficky zobrazené hodnoty měření č. 12

Na obrázku 102 jsou zobrazeny průběhy teplot os obráběcího stroje. Do bodu 8 jsou teploty zaznamenávány pro kalibrační měření a za tímto bodem teploty pro verifikační měření. Z obrázku je patrné, že při kalibračním měření se stroj trochu zahřívá, a naopak u verifikačního měření jsou teploty os ustálené. U verifikačního měření se teploty změnily o 0,7 °C. Nejvíce zahřátá osa stroje byla osa X (25,5 °C).



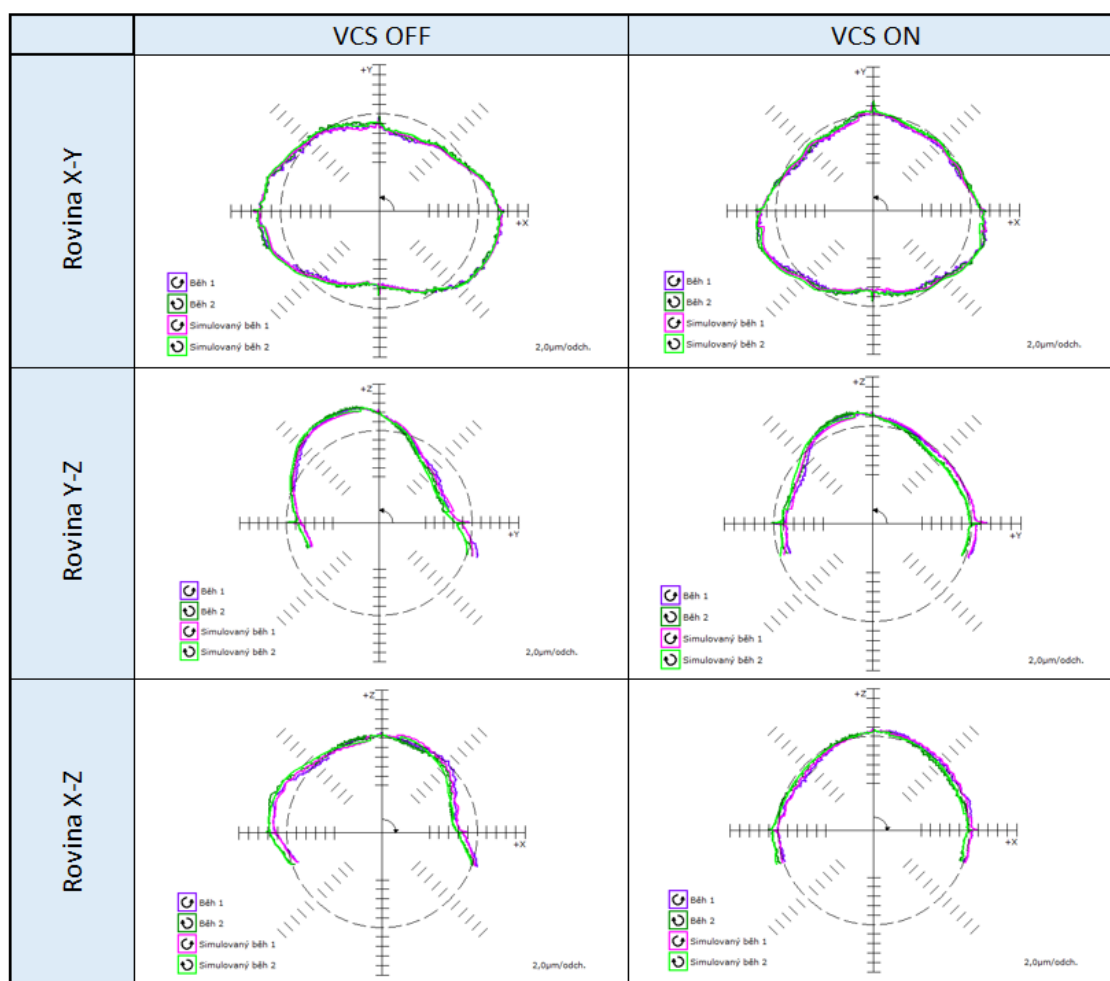
Obr. 102 Grafické zobrazení průběhu teplot při měření č. 12

Software TRAC-CAL umožňuje vykreslit základní zobrazení volumetrických odchylek v kontrolovaném prostoru. Toto zobrazení je na obrázku 103. V levé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při kalibračním měření, tedy v původním stavu stroje bez zapnutých kompenzací. Výsledná volumetrická chyba je 26 μm. V pravé části obrázku je zobrazena mapa odchylek při verifikačním měření, tedy ve stavu stroje, kdy má aktivovanou volumetrickou kompenzaci. Výsledná volumetrická chyba je 17 μm. Z obrázků 103a,b je na první pohled patrné, že se volumetrická chyba zmenšila.



Obr. 103 Grafické vyhodnocení volumetrických chyb stroje měření č. 12  
a) před kompenzací b) po kompenzací

Na obrázku 104 jsou zobrazeny výsledky měření zkoušky kruhové interpolace pomocí zařízení Ballbar QC20-W. Z obrázku 104 je patrné zlepšení ve všech třech rovinách. Například v rovině X-Y se kruhovitosť zlepšila z 10,7 µm na 8,3 µm.



Obr. 104 Kontrola geometrické přesnosti zkouškou kruhové interpolace měření č. 12